

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Mikrostrukturní a únavové
charakteristiky oceli AISI 316L
připravené 3D tiskem metodou Material
Extrusion (FDM)**

**Microstructure and Fatigue
Characteristics of the Steel AISI 316L
Prepared by 3D Print Method Material
Extrusion (FDM)**

Student:

Bc. Jan Jansa

Osobní číslo:

JAN0565

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Jansa**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Mikrostrukturní a únavové charakteristiky oceli AISI 316L připravené
3D tiskem metodou Material Extrusion (FDM)
Microstructure and Fatigue Characteristics of the Steel AISI 316L
Prepared by 3D Print Method Material Extrusion (FDM)
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav technologie FDM a 3D tisku kovů.
3. Mikrostrukturní charakteristika a únavové vlastnosti.
4. Shodnocení výsledků a porovnání s technologií Powder Bed Fusion.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. *The essential guide to 3D in Flash*. Berkeley. California: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.
HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. *3D Printing for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, [2014]. For dummies. ISBN 978-1-118-66075-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JANSA, J. *Mikrostrukturní a únavové charakteristiky oceli AISI 316L připravené 3D tiskem metodou Material Extrusion (FDM): diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 68 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá FDM metodou 3D tisku korozivzdorné oceli 316L z materiálu BASF Ultrafuse 316L. V teoretické části jsou popsány všechny aditivní technologie, kterými v současné době lze vyrábět kovové díly a charakteristika FDM tištěné korozivzdorné oceli 316L po procesu slinování. V následující, experimentální části práce je uveden podrobný popis a charakteristika tiskových parametrů, které byly použity při výrobě zkušebních vzorků. V závěru praktické části práce jsou získané výsledky materiálových vlastností z vytištěných vzorků porovnány s parametry vzorků stejné oceli 316L, které byly vytištěné odlišnou aditivní technologií SLM.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

JANSA, J. *Microstructure and Fatigue Characteristics of the Steel AISI 316L Prepared by 3D Print Method Material Extrusion (FDM): master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 68 s. Thesis head: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

The master thesis deals with FDM method of 3D printing 316L stainless steel from BASF Ultrafuse 316L material, Theoretical part describes all additive manufacturing technologies that can currently be used to produce metal parts and the characteristics of FDM printed 316L stainless steel after the sintering process. In the subsequent experimental chapter of the thesis is a detailed description and parameters that were used in the production of test specimens. At the end of the practical part of the work, the obtained results of material properties from printed samples are compared with the mechanical properties of samples of the same 316L stainless steel, which were printed by different additive technology SLM.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Úvod.....	8
1 Technologie FDM a 3D tisku kovů.....	9
1.1 Nanášení tryskáním (Material Jetting)	12
1.2 Tryskání pojiva (Binder Jetting)	14
1.3 Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion)	17
1.4 Přímé energetické nanášení (Direct Energy Deposition)	21
1.5 Vytlačování materiálu (Material Extrusion)	24
1.5.1 Markforged Metal X.....	25
1.5.2 Desktop Metal	27
1.5.3 BASF Ultrafuse	29
2 Mikrostrukturní charakteristika.....	34
2.1 Popis mikrostruktury	34
3 Příprava vzorků pro experimenty	39
3.1 Tiskárna Ultimaker S5	39
3.2 Zpracování modelu a příprava tiskových dat	41
3.3 Tisk vzorků.....	45
3.4 Odstranění pojiva a slinování.....	49
4 Zhodnocení výsledků a porovnání s technologií Powder Bed Fusion	52
4.1 Mechanické vlastnosti	52
4.2 Mikrostruktura.....	55
Závěr.....	62
Seznam použitých zdrojů	65

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značení:	Vyjádření:	Jednotka:
3D	trojrozměrný	[-]
A	tažnost	[%]
ABS	akrylonitrilbutadienstyren	[-]
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing	[-]
AM	aditivní technologie	[-]
ASA	terpolymer akrylonitril-styrén-akrylát	[-]
BJ	tryskání pojiva	[-]
BMD	depozice navázaného kovu	[-]
CAD	počítačem podporovaný design	[-]
CFF	fabrikace kontinuálního vlákna	[-]
CNC	počítačově řízený obráběcí stroj	[-]
DED	přímé energetické nanášení	[-]
DMLS	selektivní laserové tavení	[-]
DOD	Drop on Demand	[-]
E	modul pružnosti	[GPa]
EBAM	aditivní výroba elektronovým paprskem	[-]
EBM	tavení elektronovým paprskem	[-]
FDM/FFF	vytlačování materiálu	[-]
HIP	izostatické lisování za horka	[-]
HIPS	houževnatý polystyren	[-]
LENS	Laser Engineering Net Shape	[-]
MJF	Multi Jet Fusion	[-]
NPJ	tryskání nanočástic	[-]
OFS	nadměrný faktor	[%]
PBF	spékání práškové vrstvy	[-]
PVA	polyvinylalkohol	[-]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
SEM	řádkovací elektronový mikroskop	[-]
SLM	selektivní laserové tavení	[-]
SLS	selektivní laserové spékání	[-]
STL	Standard Triangle Language	[-]
Z	kontrakce	[%]

Úvod

Každá výrobní technologie prochází od doby svého vzniku určitou evolucí. Nejinak tomu bylo i u technologií obrábění, svařování apod. Tyto technologie prošly za roky své existence velmi značným vývojem a v dnešní době patří neodmyslitelně k zásadním pilířům celého výrobního průmyslu.

Avšak každá technologie má svá omezení, takže s nástupem generativního designu a používání bionických tvarů konstrukcí začaly konvenční výrobní metody značně nedostačovat. Generativní design totiž umožňuje navrhnout takové tvary a struktury, které žádnou z konvenčních výrobních metod nelze vyrobit. V tu chvíli se začíná plně projevovat přidaná hodnota technologií aditivních, jelikož těmi zmíněné struktury vyprodukovat lze.

Selective Laser Melting (dále SLM) proces tavení kovového prášku je ve velkém zájmu producentů, co se týče výroby kovových součástí aditivní technologií, již řadu let. Bylo provedeno mnoho studií poskytujících hluboké porozumění tomu, jak lze pomocí zmíněné techniky, využívající výrobní metodu Powder Bed Fusion (dále PBF), vyrábět díly z austenitického nerezového materiálu 316L (DIN 1.4404). Tato diplomová práce pojednává o inovativním postupu aditivní technologie (dále jen AM) výroby dílů z nerezové oceli 316L metodou Vytlačování materiálu (dále jen FDM) z kompozitního kovo-polymerního vlákna BASF Ultrafuse 316L ve formě struny (filamentu), která se jeví jako cenově dostupnější alternativa oproti dražším laserovým technologiím 3D tisku kovů. Metoda oproti PBF technologiím nevyžaduje během procesu tisku přítomnost inertní atmosféry a lze ji provozovat i v kancelářském prostředí na cenově dostupné, jednoduché, stolní 3D tiskárně.

Cílem práce bylo vyrobit zkušební tělíska z materiálu Ultrafuse 316L a podrobit je mechanickým zkouškám za účelem zjištění materiálových vlastností. Kovové vzorky byly v tomto případě vyrobeny pomocí technologie Fused Deposit Modeling (dále jen FDM) na zařízení Ultimaker S5, které se řadí mezi stolní 3D tiskárny a často se používá i pro průmyslové aplikace. Vytisknuté vzorky byly podrobeny po tisku nezbytnému procesu katalytického odstranění pojiva, slinování a opracování obrobením do přesného tvaru zkušebních tyčinek pro provedení mechanických zkoušek a vyhodnocení mikrostrukturních charakteristik. Za účelem porozumění materiálovým vlastnostem byly zjištěny hodnoty meze kluzu, pevnosti a prodloužení, a to zvlášť u každých ze vzorků zhotovených rozdílně ve vertikální a horizontální poloze. V neposlední řadě bylo zanalyzováno procento smrštění v jednotlivých osách, proveden rozbor mikrostruktury a hodnocení porozity.

V závěru práce byly výsledky získané tahovými zkouškami a metalurgickým rozbohem porovnány s daty, která byla získána testováním vzorků vyrobených laserovou technologií SLM ze stejného materiálu korozivzdorné oceli 316L.

1 Technologie FDM a 3D tisku kovů

Aditivní technologie (AM), jinými slovy 3D tisk, v posledních desítkách let zažívá období bujarého rozkvětu. Z prvotních, hůře dostupných a na výrobu složitých zařízení, se během pár let staly poměrně (i cenově) dostupné přístroje, zejména pro skupinu hobby tvůrců, modelářů, a dalších. Tato skupina/komunita se každým dnem rozrůstá a jednotliví výrobci zařízení pro tisk ve 3D pomocí technologie FDM se snaží sami svoji komunitu rozvíjet podporovat a směřovat k určitému růstu. Pokud je řeč o komunitách hobby tvůrců, kteří vlastní 3D tiskárny (s FDM technologií), jedná se o tisíce, ne-li desítky tisíc členů takovýchto komunit.² Jedna z podobných komunit se vyskytuje na sociální platformě Facebook. Pod názvem veřejné skupiny: *3D tisk*, lze vyhledat prostředí, které čítá téměř deset tisíc členů, a ti si navzájem radí při problémech se svými zařízeními nebo během stavby vlastních tiskáren v domácích podmínkách. Jedním z členů této skupiny je i Josef Průša, který založil v České republice jednu z nejdynamičtěji se rozvíjejících technologických společností a mimo jiné prodává cenově a uživatelsky dostupné stolní 3D tiskárny.¹

Společnost Prusa Research a.s. je uvedena z důvodů, že je to výhradně český výrobce a proto, že si během pár let svojí důmyslnou strategií a skvělými výrobky zajistila téměř až dominantní postavení na trhu s menšími stolními FDM tiskárnami.¹ Jenom samotná tato společnost prodala stovky tisíc 3D tiskáren do celého světa a na svých internetových stránkách nabízí členům své komunity sdílený prostor pro počítačové modely k tisku, které se dají volně stáhnout, nebo například fórum a další obsah v podobě tipů a triků týkajících se samotného tisku, či zajímavých článků ze světa aditivních technologií.²

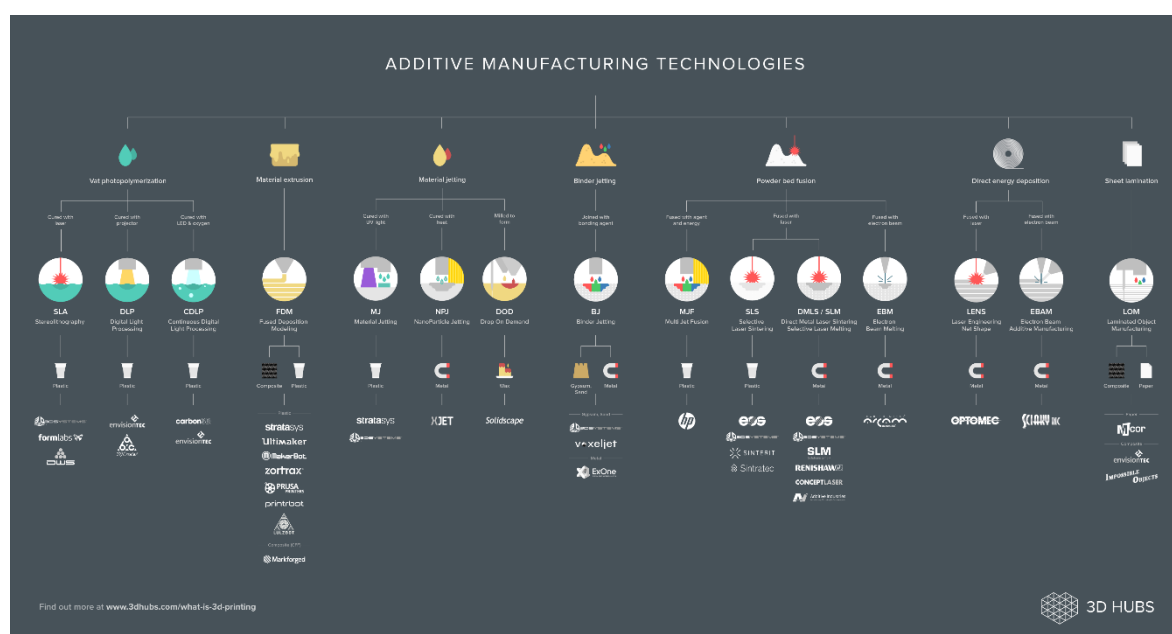
Prusa Research je řazen mezi široké portfolio dalších výrobců přístrojů založených na stejném FDM principu jako jsou například Ultimaker, Trilab, Stratasys, Markforged, MakerBot a mnoho dalších.

Jednou z výhod FDM tisku je široká škála tisknutelných materiálů. K dostání je čím dál více rozmanité množství produktů nově vznikajících producentů, ale i výrobců, kteří jsou na trhu již dobře zavedení. Z rozličných materiálů je možno uvést nejpoužívanější PLA (kyselina polyléčná), ABS, PETG, ASA nebo materiály, které se řadí do skupiny podpůrných (HIPS, PVA), materiály flexibilní, chovající se podobně jako guma, materiály speciální, do kterých jsou řazeny i kompozitní materiály obsahující příměsi dřeva, železa, mědi, bronzu a podobně.^{3,4,5} Poslední uvedená skupina je zajímavá z hlediska přidané hodnoty, kterou nabízí vícesložkový materiál v podobě lepších fyzikálních, mechanických, chemických nebo vzhledových vlastností. Jedním takovým speciálním materiálem je i typ kompozitního vlákna Ultrafuse 316L od německého výrobce BASF, který přináší vidinu cenově dostupného 3D tisku kovů, ne tentokrát pomocí profesionálních průmyslových zařízení vybavených sofistikovanou laserovou technologií, ale v dnešní době již obyčejnou stolní technologií FDM v pokojových podmínkách, což přináší obrovskou výhodu v podobě snížení nákladů na tisk. Není však jedinou technologií nabízející možnost tisku kovových

prototypů. Přesněji řečeno je v tomto odvětví nováčkem mezi již zaběhlými technologiemi 3D tisku kovů, které jsou členěny do několika skupin.

Společnost 3D Hubs na svém webovém portálu dělí technologie do 7 hlavních skupin v závislosti na druhu formování jednotlivých vrstev viz obrázek 1.1. Byla založena v roce 2013 a za dobu svého působení se z ní stal jeden z největších globálních leadrů v oblasti aditivních technologií a jejich distribuce.⁶ Rozdělení bylo vyvozeno z norem ISO/ASTM 52900:2015.³²

Zvolit nejvhodnější způsob výroby (AM) pro konkrétní aplikaci může být obtížné. Široká škála 3D tiskových technologií a materiálu k tisku často znamená, že několik z nich může být rentabilních, některé oproti tomu nabízejí lepší rozměrovou přesnost, v potaz je brán také požadavek na provedení následné povrchové úpravy nebo jiného zpracování v rámci post-processingu.



Obrázek 1.1 – Rozdělení aditivních technologií dle portálu 3D Hubs⁶

Aditivní výrobu charakterizuje norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology), která ji rozděluje do 7 odlišných technologických principů dle zhotovení vrstev a současně definuje termíny používané v aditivní výrobě. Členění je následující:³³

- **Fotopolymerace** (Vat Photo-polymerization) – fotopolymerní kapalina (pryskyřice) v nádobě je vrstvu po vrstvě vytvrzována světlem.
- **Vytlačování materiálu** (Material extrusion) - materiál je vytlačován skrze trysku, která se pohybuje po předem stanovené trajektorii, metoda je užívána především pro tisk termoplastů.

- **Nanášení tryskáním** (Material Jetting) – kapičky materiálu jsou selektivně ukládány, tisknout lze polymery, vosky a kovy.
- **Tryskání pojiva** (Binder Jetting) – tekuté pojivo je vrstvu po vrstvě výběrově nanášeno za účelem spojení práškových materiálů, lze tisknout kovy, písek a keramiku.
- **Spékání práškové vrstvy** (Powder Bed Fusion) – tepelná energie vyzářená pomocí paprsku (laser nebo elektronový paprsek) spéká práškový materiál vrstvu po vrstvě, fabrikovat lze oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, polymery, kompozity a exotické materiály.
- **Přímé energetické nanášení** (Direct Energy Deposition) – materiál je v podobě prášku nebo drátu nataven soustředěnou energií i během změny polohy.
- **Laminace plátů** (Sheet Lamination) – pláty materiálu jsou spojovány do celku tvořícího model.

Aditivní technologie se hojně využívají pro výrobu kovových součástí v leteckém, automobilovém, biomedicínském průmyslu, ve strojírenství, potravinářství, mechatronice a robotice. Populární komercializované AM kovů zahrnují Selektivní laserové tavení (SLM/DMLS), LENS (Laser-Engineered Net Shaping), EBM a jiné, všechny používající jako základní materiál atomizovaný kovový prášek.⁷ Zmíněné technologie jsou všechny v pokročilých fázích svého vývoje a již několik let používány jak v průmyslu, tak v akademické sféře. V současnosti neslouží AM pouze k produkci komplexních struktur pro malosériovou nebo prototypovou výrobu, ale i jako alternativa náročných výrobních technik s vysokou přidanou hodnotou výrobků. Všechny uvedené technologie však mají společnou vlastnost, kterou je v tomto případě vysoká pořizovací cena a potřeby investic do nezbytné infrastruktury v řádu milionů korun nebo desítek tisíc euro. Nelze však hovořit pouze o samostatných zařízeních, protože další poměrně náročnou položkou jsou vedlejší a doplňková zařízení, která jsou k výrobě pomocí laserových technologií nepostradatelné.⁷ Například systém SLM využívající energie laseru k tavení práškové vrstvy vyžaduje během procesu stabilní inertní atmosféru v procesní komoře, systém zajišťující filtraci a cirkulaci inertního média a chladič udržující jednotku laseru ve specifických provozních teplotách.⁷

Rapidní nárůst poptávky po aditivních technologiích v oblastech menších výrobních podniků, univerzitních laboratořích nebo jiných vzdělávacích institucích vyžaduje a bude vyžadovat ekonomičtější procesy fabrikování kovových součástí a dostupnější techniky 3D tisku kovů, nežli jsou například technologie SLM/DMLS nebo EBM.

Díky své korozní resistenci, vysoké pevnosti a biokompatibilitě je nerezová ocel 316L široce využívána v biomedicínských aplikacích. V oblasti výzkumu materiálových

charakteristik bylo provedeno mnoho studií týkajících se procesních parametrů SLM technologie a jejich vlivu na mikrostrukturu, biokompatibilitu, mechanické vlastnosti, korozní a únavové charakteristiky. Studie zkoumaly vliv rychlosti pohybu laserového paprsku na hustotu oceli a nízkou hladinu porozity. Další porovnávaly mikrostrukturní a mechanické chování 316L vzorků vyrobených různými technikami (SLM, tváření za tepla a odlévání) včetně schopnosti odolávat opotřebení a tak dále.⁷

Do doby vzniku této práce však nebylo provedeno mnoho studií zabývajících se charakteristikami oceli 316L připravené technologií FDM – extruzí kompozitního materiálu ve formě struny. Na trhu mezi výrobci filamentů se v posledních letech začal objevovat nový typ materiálů, jako nedávno vyvinutý, BASF Ultrafuse 316L. Jedná se o kovový kompozitní filament uzpůsobený k tisku na stolních a cenově dostupných tiskárnách v kancelářských nebo pokojových podmínkách. Průměr struny (filamentu) je stejný jako u běžně používaných materiálů typu PLA, ABS, PETG 1,75 nebo 2,85 mm a díky tomu jej lze používat na jakékoliv FDM tiskárně. Filament je kompozit složený z polymerního pojiva a vysokého obsahu kovového prášku, který je v pojivu navázán.⁸ Podrobný popis zpracování filamentu Ultrafuse a charakteristika tiskových parametrů včetně dalších doporučení byly popsány v kapitole 1.5 a 3 této práce.

V následujících kapitolách jsou uvedeny všechny hlavní směry tisku kovových materiálů vycházejících z rozdělení AM dle normy ISO/ASTM 52900:2015 včetně popisů jednotlivých technologií a jejich principů, podoby a druhů zpracovávaných látek. FDM tisk kovů mezi těmi, které jsou již delší dobu nasazeny v průmyslu, zaujímá poměrně nové postavení.

1.1 Nanášení tryskáním (Material Jetting)

Kategorie nanášení tryskáním obsahuje 3 podskupiny, jimiž jsou:⁶

- Material Jetting (MJ) nanášení tryskáním (polymery),
- Drop-on-Demand (DOD) výroba především voskovitých modelů,
- Nano particle jetting (NPJ) věnující se tisku kovů a keramiky.

Nanášení tryskáním je technika, při níž je ze stovek miniaturních trysek v tiskové hlavě selektivně uvolňován fotopolymer, který tvoří součást jednu vrstvu za druhou. To umožňuje operacím tryskání materiálu nanášení vrstvy pomocí linie, namísto bodu, kterému trvá zpracování jedné vrstvy několikanásobně vyšší čas. Jakmile jsou kapičky aplikovány na stavební platformu, jsou ihned vytvrzovány pomocí UV světla. Proces tisku tryskáním materiálu vyžaduje podpory, které bývají tištěny současně s polymery, avšak z rozpustného, v rámci post-procesních úprav, lehce odstranitelného typu materiálu.⁶

Technologie je vhodná pro velmi realistické prototypy, poskytující excelentní detaily a vysokou rozměrovou přesnost s hladkým povrchem. Princip nabízí možnost tisku z rozličných typů materiálů, včetně široké škály barev, a to během jednoho tiskového

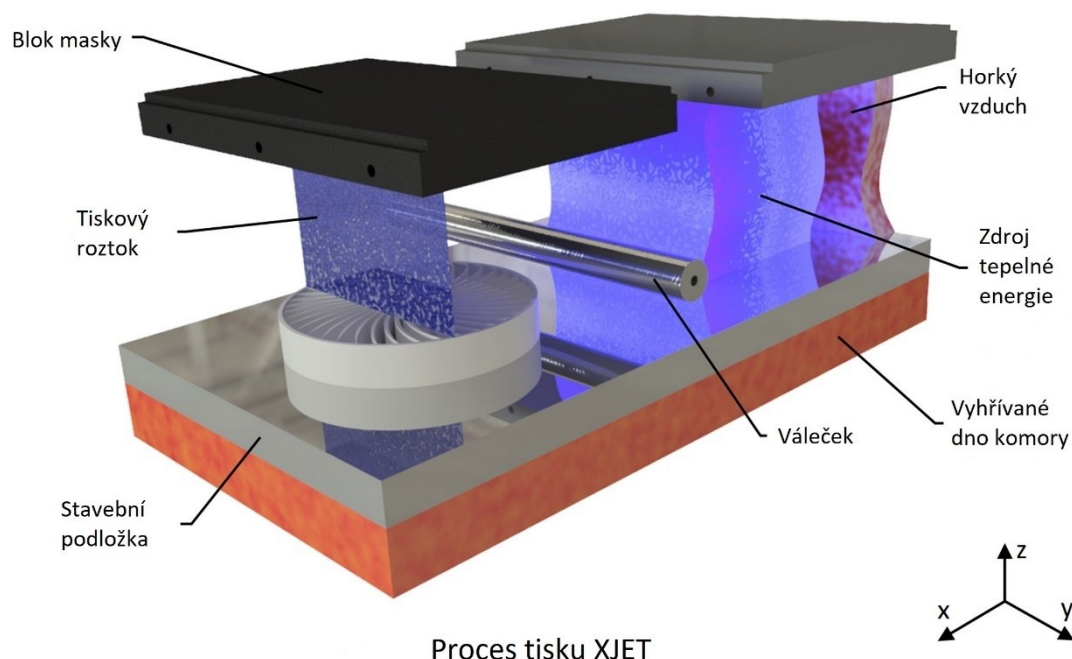
procesu. Největšími nevýhodami techniky jsou vysoké náklady, a především křehké mechanické vlastnosti výtisků z fotopolymerů aktivovaných UV zářením.⁶

DOD tiskárny mívají dvě tiskové hlavy, z nichž jedna ukládá stavební materiál (typicky vosku podobnou tekutinu) a druhá rozpustný podpůrný materiál. Stejně jako u většiny tradičních technik AM tiskové hlavy tiskáren následují předem danou trajektorii a nanášejí materiál pomocí bodové oblasti. Tato zařízení také obsahují dokončovací hlavu, která přejíždí stavební prostor po každé vrstvě z důvodu zajištění perfektně rovného povrchu předchozí vrstvy před tiskem další. DOD se typicky využívá v nejvyšší míře pro tisk voskovitých modelů, sloužících pro výrobu forem na odlévání metodou ztraceného vosku.⁶

NPJ užívá k tisku tekutiny, které obsahují kovové nebo podpůrné nanočástice, vložené do tiskárny jako obsah kazet a tryskané na stavební podložku v extrémně tenkých vrstvách kapiček, díky čemuž mají výtisky velmi jemný povrch a vysokou přesnost.⁶ Tekuté suspenze jsou dodávány od výrobce a instalovány do zařízení ve speciálních uzavřených kazetách.⁹ Tyto kapalně roztoky slouží jako základní stavební blok NPJ procesu, na rozdíl od jiných technik tisku kovů, které vyžadují zacházení s těžko manipulovatelnými a nebezpečnými kovovými prášky.⁹

Depozice materiálu na bázi roztoku tvoří subkategorii skupiny Tryskání materiálu, kdy je v tekutině, chovájící se jako nosič, obsaženo malé množství pevné látky. Tento přístup umožňuje pevným částicím, aby byly tištěny na tiskárnách podobných principem inkoustovým, přičemž současně udržovat viskozitu nosné tekutiny pod limitující hranicí, která zajišťuje funkčnost celého procesu. Viskozita je v tomto případě jednou z nejdůležitějších vlastností. Díky výšce vrstvy 10 μm a rozlišení trysek 1200 DPI (20 μm) je možné tisknout velmi detailní součásti.^{9, 10}

Během tiskového procesu přejíždí blok masky nad stavební plochou v horizontální rovině x-y pomocí polohovadla. Masky obsahuje 24 tiskových hlav, z nichž má každá 512 trysek. Dvanáct z tiskových hlav je používáno na podpůrný materiál. V průběhu přejíždění tiskové masky přes platformu je deponována spousta drobných kapiček suspenze na stavební podložku, jejíž teplota se udržuje mezi 160-230 °C. Při kontaktu kapiček s horkým povrchem podložky dochází k vypařování kapaliny a na místě zůstávají pouze pevné částice suspenze, které jsou pokryty velmi tenkou vrstvou pojiva. Z důvodu podpory procesu odpařování tekutiny ze stavební podložky je přejezd bloku masky ihned následován topnou lampou skládající se ze šesti halogenových lamp a dmychadla horkého vzduchu. Jakmile je nosná kapalina plně odpařena, jsou zbývající částice konečně schopny se vzájemně spojit. Po dokončení čtyř průchodů přejede váleček poslední nově natištěnou vrstvu, aby přesně definoval konstantní výšku vrstvy v celé ploše. V tento moment se celý blok masky posune ve vertikální poloze o výšku vrstvy a započne znovu stejný proces. Ilustrace celého procesu tisku je znázorněna na obrázku 1.2.¹⁰



Obrázek 1.2 – Schéma technologie XJET¹⁰

Po dokončení všech vrstev výrobku následuje proces sintrování, který definuje finální mikrostrukturu. Sekvence je iniciována periodou chladnutí, která je spuštěna ještě ve chvíli, kdy jsou fabrikované součásti stále ve stavební komoře. Po procesu dochlazení je celá tisková deska se součástmi vytažena a umístěna do sušícího boxu, aby tak došlo k plnému rozvoji pevnosti takzvaných (zelených) vytištěných součástí (green parts). Následovně je dokončen proces odstraňování podpor v kádi s rozpouštědlem, kde je podpůrný materiál zcela rozpuštěn. Nakonec jsou finální součásti transportovány do sintrovací pece a vystaveny tak vysokým teplotám, aby došlo ke vzniku téměř plné hustoty výrobků a zisku konečných materiálových vlastností.¹⁰

Průkopníkem v tomto oboru tisku je společnost XJET, která technologii Nanoparticle JettingTM vyvinula a zároveň nechala patentovat. Je tedy v současnosti jediným výrobcem NPJ tiskáren.^{9,10}

1.2 Tryskání pojiva (Binder Jetting)

Tryskání pojiva kovů prochází v posledních letech renesancí. Během poslední dekády vstoupilo do kompetitivního módu mnoho společností, každá s vlastním přístupem k této technologii. Tato skutečnost je poháněna lukrativními příležitostmi, které metoda nabízí. Jednou z nich je fakt, že rychlost a přesnost BJ procesu mu může pomoci se stát vysokoobjemovou metodou produkce výrobků.¹²

Binder jetting technologie selektivně deponuje vazebné pojivo na tenké vrstvy prášku.¹² Práškové materiály jsou buďto založené na bázi keramiky (například sklo nebo sádra) nebo kovu (nerezová ocel). Tisková hlava se pohybuje nad stavební platformou a tryská drobné kapičky pojiva, konající podobný pohyb jako 2D inkoustová tiskárna na papír. Ve chvíli,

kdy je vrstva hotova, práškové lože se posune směrem dolů a je položena nová vrstva prášku na celou plochu stavební komory.^{6, 12} Díky pojivu je další vrstva natištěna a zafixována k vrstvě předchozí.¹¹ Proces se takto opakuje, dokud nejsou vytisknuty všechny součásti.⁶

Po vytištění jsou součásti v takzvaném zeleném stavu a vyžadují následující postprocessing ještě předtím, než jsou připraveny k použití. Nenavázaný sypký prášek v loži, který obklopuje vytištěné součásti, tvoří podporu převislým okrajům modelů během procesu stavby a po dokončení tisku jej lze jednoduše odstranit stlačeným vzduchem. Jakmile jsou hotové modely zbaveny zbytkového prášku, procházejí zelené součásti termálním zpracováním.¹¹

V rámci dokončení vyžadují součásti rozdílné kroky úprav. Cílem těchto úprav je dodat prototypům tuhost. Úpravy zahrnují operace zrání, slinování, a ostatní dokončovací procesy. Zrání zvyšuje sílu zelených součástí do takové míry, aby mohly být bezpečně manipulovány. Během procesu jsou výrobky vytvrzovány v peci při zhruba 200 °C po dobu několika hodin.¹²

Navzdory zrání jsou součásti stále vysoce porézní. Ke snížení porozity se tedy využívá technologického procesu slinování nebo infiltrace. Slinování probíhá většinou v peci s kontrolovanou atmosférou, kde jsou prototypy nahřáty zhruba na 100 °C na 24-36 hodin a díky tomu dochází k odhoření pojiva. To přispívá ke slučování kovových částic dohromady a vede ke vzniku tuhého kokového výrobku s nízkým procentem porozity.^{11, 12} Slinování však může způsobit nehomogenní smrštění součástí a je těžce predikovatelné, a proto musí být bráno v potaz už ve fázích designu součástí.¹²

Aby bylo dosaženo ještě vyšší hustoty, je potřeba součásti infiltrovat. Infiltrant zaplní mezery vzniklé vyhořením pojiva. Proces se většinou provádí aplikováním roztaveného bronzu, který způsobí infiltraci zbývajících dutin v součástech. Postupy jako infiltrace bronzem napomáhají například u nerezové oceli dosažení finální hustoty až 95 %.¹² Pro infiltraci keramiky je užíváno kyanoakrylátové adhesivum.⁶

Jelikož výroba kovových prototypů technologií tryskání pojiva rozlišuje a vzájemně separuje procesy slinování prášku a tvorbu samotného modelu, vyhýbá se jistým technologickým specifikům jako používání podpor, které jiné metody tisku kovů vyžadují. V tomto případě je řeč o nutnosti používání podpor, která spojuje procesy aplikující přímou energii (např. laser) ke tvorbě vrstev modelů. Dovednost fabrikovat kovové součásti v práškovém loži bez nutnosti kotevních podpor zprostředkovává technologii schopnost tvořit velké komplexní geometrie výrobků bez nutnosti náročného očišťování v rámci postprocessingu. BJ je díky svým vlastnostem škálovatelnou technologií, protože nevyžaduje uzavřenou tiskovou komoru a nabízí vysokou produktivitu zprostředkovanou a převzatou technologií inkoustových tiskáren. Navíc nepoužívá ke spojování materiálu energetický paprsek, a je tedy vhodná ke zpracování i opticky reflexivních materiálů jako je například měď, které je technologií práškového lože těžce proveditelné.¹¹

Tryskání pojiva založené na bázi keramiky je ideální pro estetické aplikace (architektonické modely, zhodnocení ergonomie, ...). Není však vhodné pro výrobu

funkčních prototypů, jelikož jsou součásti velmi křehké. Používá se také pro výrobu modelů, které jsou využívány k tvorbě forem na odlitky.⁶

Jak zobrazuje obrázek 1.3, tryskané kapičky pojiva interagují s částicemi prášku a tvoří útvary, které se spojují a tvoří řezovou vrstvu. Proces se celý opakuje a vzniká tak postupně výrobek, který je obklopený práškem.



Obrázek 1.3 – Schéma procesu tryskání pojiva⁶

Jedním z nejstarších distributorů BJ technologie je společnost ExOne, nabízející několik zařízení, která prošla značným vývojem. Poslední víceúčelová platforma společnosti nese název Innovent+ a nabízí široké pole využití nebo vylepšení v podobě ultrazvukového nanášeče vrstev, který zajišťuje zvýšenou kvalitu výrobků.¹³

Dalšími výrobci zařízení s BJ technologií jsou společnosti Digital Metal ze Švédska, 3DEO, která metodu rozšířila o v procesu integrované CNC operace, společnost Desktop Metal, která se mimo jiné věnuje i dostupnějšímu tisku kovů například v kancelářských prostorách, kterým se věnuje i tato práce. Poslední z větších podniků je jeden z největších výrobců tiskových zařízení na světě společnost HP, která v roce 2018 představila systém Metal Jet s velmi vysokou produktivitou a spolehlivostí cílící především na sériovou a velkosériovou výrobu.^{12, 14}



Obrázek 1.4 – Součásti v zeleném stavu po vytištění

1.3 Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion)

Technologie Spékání práškové vrstvy (PBF) produkuje pevné výrobky pomocí zdroje tepla, který vyvolává slučování (slinování nebo tavení) částic polymerního nebo kovového prášku v jedné vrstvě.⁶ V nynější době se řadí mezi nejvíce oblíbené, komerčně používané a technologicky vyspělé metody AM pro výrobu kovových prototypů. Metody jsou charakterizovány procesem nanesení jedné vrstvy prášku o specifické výšce. Tyto vrstvy jsou opakovaně vystaveny vysokému tepelnému toku, způsobujícímu v případě polymerů slinování nebo u kovových prášků roztavení. Roztavený prášek se spojí po vychladnutí do celistvé vrstvy modelu. Proces je opakován, dokud nejsou zpracovány všechny vrstvy výrobků.¹⁵ Většina PBF technologií používá mechanismus rozprostření a uhlazení vrstev prášku v průběhu fabrikování součástí přes celou plochu komory, což vede ke skutečnosti, že jsou finální komponenty na konci procesu tisku obklopené a uzavřené v prášku. Několik variant metody se různí odlišným zdrojem energie (například laserové nebo elektronové paprsky) a druhem použitého prášku (polymery, kovy, kompozity).⁶ Po skončení tisku je nespečený prášek odebírán a po přesetí v prosévací stanici znovu použit.¹⁵

PBF zahrnuje technologie SLS a MJF, které se věnují aditivní výrobě z polymerních materiálů, zatímco další dvě metody SLM/DMLS a EBM zpracovávají výhradně prášky kovového charakteru.

Selektivní laserové spékání (dále jen SLS) je jednou z vývojově novějších a nejvíce pokročilých technologií aditivní výroby. SLS je proces fabrikace v jednom kroku, zahrnující laserový paprsek, který selektivně spéká částice prášku ve vrstvě, čímž postupně tvoří 3D strukturu. Zařízení využívající technologii SLS obsahuje práškové lože (stavební komoru), zásobník prášku, nanášecí prášku a zdroj laserového paprsku. Tisknutý prášek je rovnoměrně rozprostřen po práškovém loži pomocí nanášedce. V závislosti na 3D designu objektu je laser fokusován a kreslí specifické vzory do práškové vrstvy a slinuje dohromady částičky prášku. Jakmile je dokončen proces slinování první vrstvy, sjede práškové lože o hodnotu výšky vrstvy směrem dolů, nanášecí rozprostře další vrstvu prášku a dochází ke slinování další vrstvy. Celý cyklus fabrikace vrstvy se takto opakuje až do chvíle, než je celá součást vytištěná. Technologie byla vyvinuta k tisku 3D objektů za vysokých teplot při použití kovových, keramických nebo termoplastických materiálů jako PA12 (Nylon) nebo PEEK (Polyether ether keton).¹⁶

SLS produkuje pevné plastové výrobky za využití laseru, který slinuje tenkou vrstvu práškového materiálu vždy po jedné vrstvě. Proces začíná rozprostřením počáteční vrstvy prášku přes stavební platformu. Řez výrobku je skenován a slinován paprskem, a způsobuje přechod z práškové do tuhé formy materiálu. Výsledkem celého procesu jsou výrobky obklopené neslinutým práškem. Součásti jsou po vychladnutí vyjmuty z prášku, očištěny a připraveny přímo k použití nebo dalším úpravám (barvení, ...).⁶

Mezi největší výrobce a distributory technologie SLS patří společnosti jako EOS, 3DSYSTEMS, SINTRATEC, SINTERIT a mnohé další, jelikož je tato technologie jednou z nejpoužívanějších mezi AM.⁶

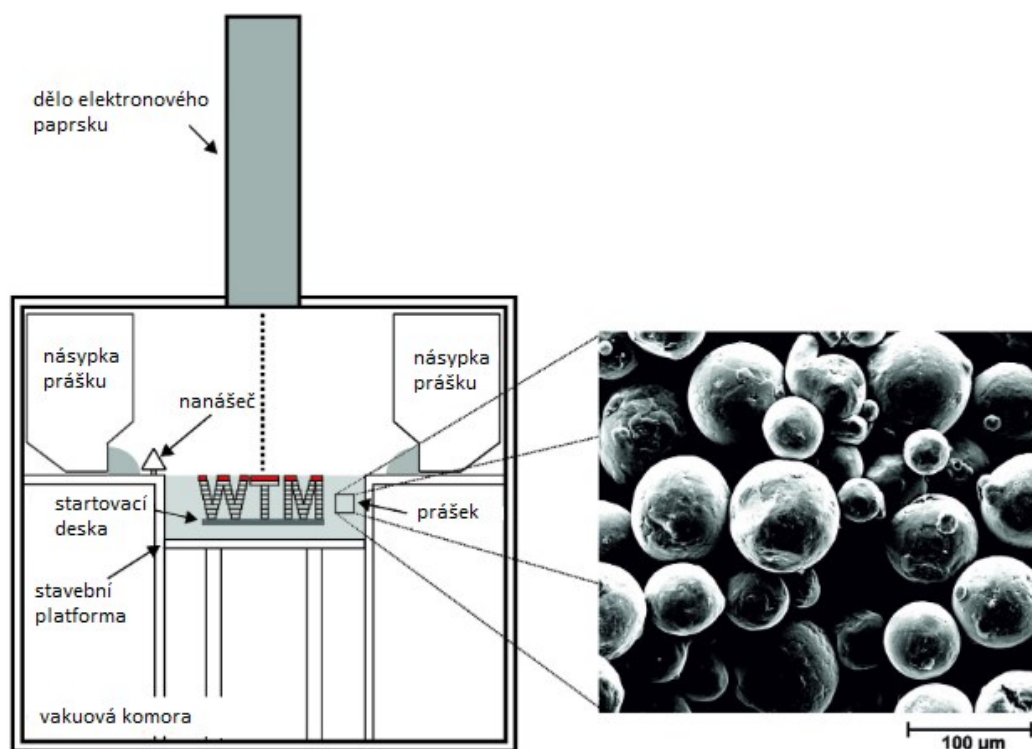
Multi Jet Fusion (dále jen MJF) je v podstatě kombinace technologií SLS a Nanášení tryskáním.⁶ Během MJF jsou nejprve do stroje vloženy práškové zásobníky, ze kterých je následně naložen prášek do stavební jednotky. Potom je prášek rozprostřen pomocí nanášeče na platformu a utvoří tenkou vrstvu, která je vzápětí předeřtata pomocí fixních infračervených lamp umístěných nad stavební platformou.¹⁷ Tisková hlava obsahující jednu sadu trysek a dvě sady otevřených infračervených lamp přejede přes rozprostřenou vrstvu a deponuje na vrstvu fúzní čínidlo a detailní čínidlo. Spojovací čínidlo, které je sprejováno do vnitřku řezu dílů je užíváno pro zrychlení procesu absorpce energie prášku z vysokoenergetických infračervených lamp. Detailní čínidlo, které je tryskáno na konturu řezu součástí, se užívá k oddělení výrobků od prášku a ke snížení povrchové drsnosti. Po zahřátí zdrojem záření prášek ošetřený fúzním čínidlem roztaje, krystalizuje a spojí se.^{6, 17}

Celý děj je opakován, dokud nejsou výrobky kompletní.⁶ Výhodou technologie MJF oproti SLS je, že zpracovává prášek linií záření oproti bodu, který používá SLS. Tato skutečnost je dána technologicky, jelikož u metody SLS probíhá slinování řezu práškové vrstvy bodovým zdrojem energie, který tvoří průsečík paprsku laseru s vrstvou prášku namísto linie infračervených lamp, kterou využívají zařízení MJF, díky čemuž je doba zpracování vrstvy několikanásobně kratší.¹⁷ Další výhodou je doba chladnutí a postprocessing. Jediný výrobce MJF zařízení společnost HP nabízí specializovanou postprocesní stanici, která významně zvyšuje rychlost chlazení stavební komory a napomáhá s odstraňováním prášku. Použitý prášek může být z 80-85 % znovu použit.⁶

Tavení elektronovým paprskem (dále jen EBM) technologie je proces, kdy jsou vrstvy kovového prášku pokládány jedna na druhou a selektivně taveny.¹⁸ EBM (někdy také SEBM) využívá k vyvolání fúze mezi částicemi kovového prášku vysokoenergetického paprsku namísto laseru. Fokuseovaný elektronový paprsek skenuje tenkou vrstvu práškového kovu a způsobuje lokální tavení částic a navazující vytvrzování ve specifické řezové oblasti vznikajících výrobků.⁶ Výrobu jedné vrstvy lze rozdělit do čtyř kroků: aplikace rovnoměrné vrstvy o určité výšce, předeřtání vrstvy prášku pro zlepšení vodivosti a zamezení vzniku kouřového efektu způsobeného odpuzováním negativně nabitých částic, selektivní tavení a na závěr zpětný chod stavební podložky (substrátu) o výšce jedné vrstvy.¹⁸ Systémy s elektronovým paprskem produkují méně vnitřních pnutí ve výrobcích, díky čemuž dochází k menším deformacím a je potřeba méně podpěr a kotevních struktur. Navíc EBM používá méně energie a je schopno produkovat vrstvy v rychlejším tempu než podobná laserová metoda SLM (Selektivní laserové tavení), avšak tloušťka vrstev, velikost částic a povrch výrobků bývají nižší kvality. Pro fungování procesu jsou nezbytné podmínky vodivosti fabrikovaného materiálu a hlubokého vakua v procesní komoře.⁶

Použití EBM při specifických aplikacích, jako je výroba z měděného prášku, nabízí výhodu ve skutečnosti, že paprsek není odrážen vysoce odrazivým povrchem mědi (jako je tomu u laserových AM) a disipuje energii uvnitř materiálu. To umožňuje tavení s vysokou hustotou energie, která společně s možností pohybu paprsku bez setrvačnosti, poskytuje vysokou rychlost procesu. Průběh výrobních cyklů ve vakuu garantuje vysokou čistotu a nabízí možnosti zpracovávání materiálů citlivých na kyslík a dusík jako jsou například slitiny titanu.¹⁹

Společnost Arcam původem ze Švédska uvedla technologii EBM se schopností výroby komplexních struktur pomocí elektronového paprsku na trh v roce 2002. Později v roce 2016 proběhla akvizice podniku společností GE Additive, a ta je tedy nyní jedinou organizací nabízející zařízení založená na principu EBM.²¹

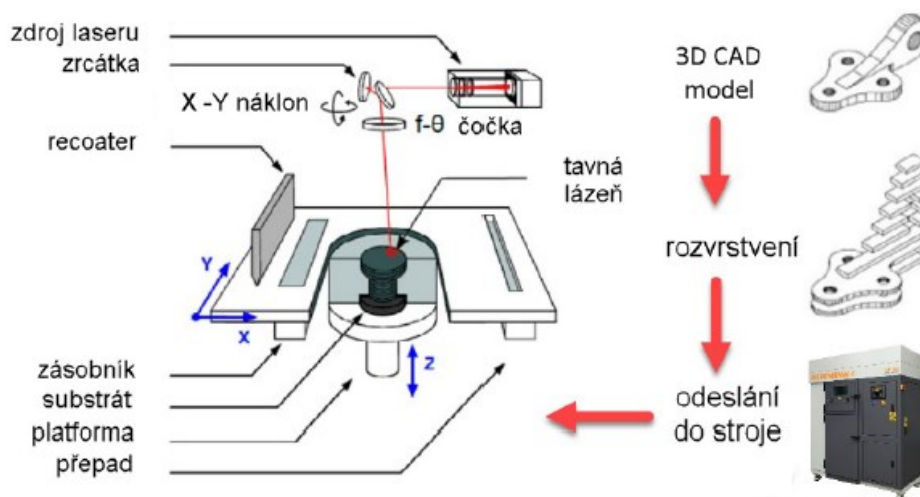


Obrázek 1.5 – Schéma EBM stroje Arcam S12 a sken prášku Ti-6Al-4V z elektronového mikroskopu²⁰

Selektivní laserové tavení (DMLS/SLM) obě metody produkují součásti podobnou metodou jako SLS technologie. Hlavním rozdílem je, že SLM/DMLS jsou používány pro kovové materiály (SS 316L, AlSi10Mg, Inconel 718, Ti-6Al-4V, ...).⁶ SLM dosahuje plného natavení prášku, zatímco DMLS zahřeje prášek na teplotu blízkou teplotě tavení, což umožní částicím spojit se chemickou cestou dohromady. DMLS funguje pouze se slitinami (niklové slitiny, Ti64 atd.), načež SLM může používat jako základní materiál kovové látky obsahující pouze jednu komponentu jako například hliník. Na rozdíl od SLS vyžadují jak SLM, tak DMLS podpurné struktury ke kompenzaci vysokých vnitřních pnutí, generovaných během tiskového procesu. Použití podpor pomáhá limitovat pravděpodobnost vzniku kroucení součástí a deformací.⁶

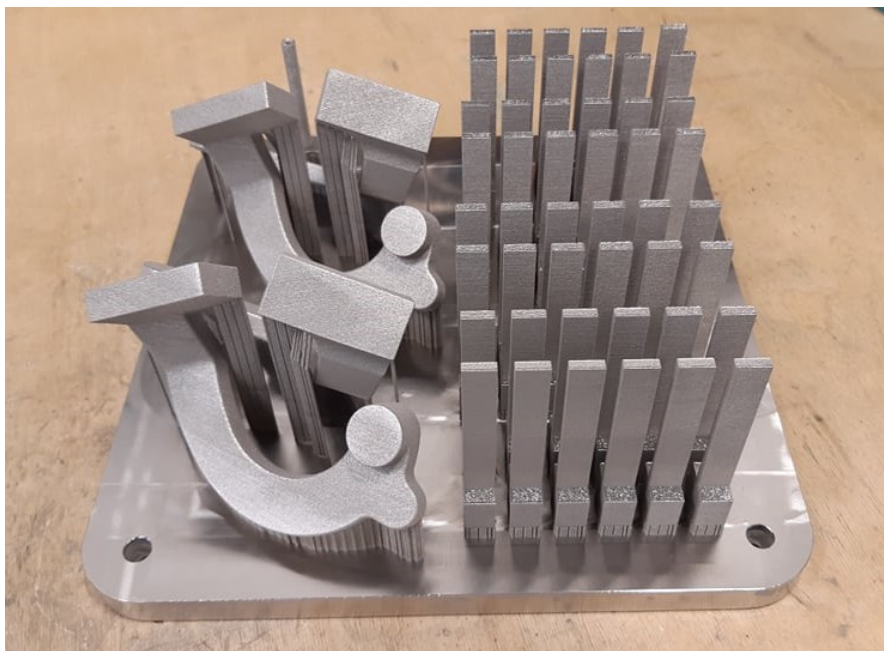
SLM funguje na principu skenování vrstvy prášku laserovým paprskem podle 3D modelu, který byl pomocí softwaru rozdělen do vrstev, jak ilustruje obrázek 1.6. Natavení prášku a spojení nově vzniklé vrstvy s vrstvou předchozí zajišťuje vysoká intenzita laserového paprsku. Výrobky jsou tištěny na stavební substrát, který má většinou podobné chemické složení jako zpracovávaný práškový materiál. Jakmile proběhne celý cyklus fabrikace jedné vrstvy, posune se substrát v ose Z směrem dolů o rozměr výšky jedné vrstvy a recoater (čepel nebo wiper) rozhrne prášek v požadované výšce vrstvy přes celou plochu stavební komory. Proces je opakován, dokud nevznikne celý model.¹⁵

Kompletní postup výroby probíhá v inertní atmosféře, aby byl minimalizován efekt oxidace a kontaminace z vnějšího prostředí. Narušení stabilní inertní atmosféry může způsobit selhání celého procesu stavby. Jako inertní médium je používán argon, který způsobí koncentraci kyslíku pod hranici 0,1 %, aniž by došlo ke vzniku vakua. V průběhu tisku je plyn hnán do komory a jeho proudění přes substrát s práškem neustále přesouvá zbytkový kyslík, aby nedocházelo ke vztlaku. Proud média s sebou navíc odnáší nechtěné spečené částice prášku, které vznikají procesní nestabilitou.¹⁵



Obrázek 1.7 – Schéma procesu SLM a postup návrhu součásti¹⁵

Po skončení tisku je prášek obklopující součásti odstraněn do přepadu a celý substrát i se součástmi je odmontován ze stroje (obrázek 1.8). Výrobky musí být ze substrátu odřezány a mohou procházet dalším tepelným zpracováním nebo postprocesními úpravami v závislosti na požadavcích výsledných užitných vlastností.



Obrázek 1.8 – Fotografie dílů s podporami na substrátu vytištěných SLM technologií

SLM/DMLS procesy jsou největší skupinou aditivní výroby kovových dílců.^{6, 15} Díky tomu je na trhu velké množství výrobců zařízení SLM technologií. Jako příklad jsou uvedeni větší a významnější výrobci zaujímající majoritní postavení na poli AM jako EOS, Renishaw, 3DSYSTEMS, SLM Solutions, GE Additive, CONCEPTLASER, TRUMPF, Additive Industries, ale i například tradiční výrobci obráběcích zařízení jako jsou DMG MORI a další.

1.4 Přímé energetické nanášení (Direct Energy Deposition)

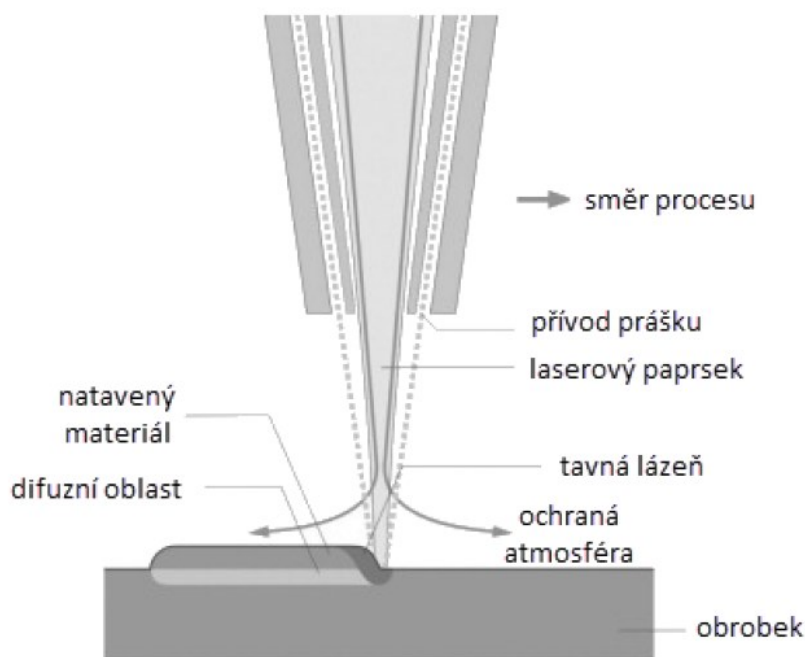
Přímé energetické nanášení kovů (dále jen DED) vytváří díly tavením materiálu ve chvíli, kdy je deponován. Používá se materiál převážně ve formě kovových prášků nebo drátů a proces je často označován také jako depozice kovů (DMD-Direct Metal Deposition). Skupina se dělí na dvě podskupiny dle typu fúzního paprsku, na podskupinu využívající laser a druhou pracující s elektronovým paprskem.⁶ Typické DED zařízení se skládá z trysky namontované na multi-osovém rameni, která tryská přídavný materiál na povrch, kde je nataven a vytvrzen. Proces je podobný metodě Vytlačování materiálu, s rozdílem, že se tryska může pohybovat ve více směrech a není fixována ve specifických osách. Materiál, který může být nanášen pod libovolným úhlem právě díky čtyřem nebo pěti osám zařízení, je při uložení roztaven laserovým nebo elektronovým paprskem. Přídavným materiálem mohou být polymery, keramika, ale v nejvyšší míře jsou využívány kovy ve formě buď prášku nebo drátu.²³

DED nabízí zajímavé možnosti v oblastech oprav a rekonstrukcí existujících opotřebovaných komponent a výroby protektivních povlaků včetně keramicko-kovových kompozitních povlaků. Hlavní výhoda oproti konvenčním způsobům nanášení povlaků

(plazmové a termické nástřiky) tkví ve skutečnosti, že proces zahrnuje vysoké hustoty energie s lokalizovaným rapidním zahříváním a tavením materiálu s minimálním tokem tepla proudícího do substrátu, po kterém následuje rychlé ochlazení samo-chlazením v důsledku velkých teplotních gradientů. Avšak lokalizované zahřívání, rychlé ochlazování a velké teplotní gradienty vyvolávají silná napětí, která mohou nepříznivě ovlivňovat kvalitu a mechanické vlastnosti povlakovaných komponent nebo vytištěných součástí.²²

Laser Engineering Net Shape (dále jen LENS) využívá tiskovou hlavu, která se skládá z laserové hlavy, trysky pro dávkování prášku a hadičku přívodu inertního plynu. Laser taví proudící prášek, který proudí z dávkovací trysky a tím staví vrstvu po vrstvě pevný dílec. Paprsek tvoří na součásti natavenou oblast (melt pool), do které je tryškán jako přídavný materiál prášek. V oblasti natavení pak dochází k rozpuštění částic prášku a následně k jejich přechodu do pevného fázového stavu. Stejným principem funguje podávání materiálu v podobě drátu, který však není do oblastí tavení přiváděn tryškáním, ale podáváním o určité rychlosti. Stavební podložka (substrát) je typicky plochý kovový plát nebo existující díl, na který je aditivně přidáván materiál (například oprava).⁶

LENS metoda probíhá v hermeticky uzavřené komoře, která je zaplavená argonem tak, aby hladina vlhkosti a kyslíku zůstávala pod 10 ppm. Takovéto prostředí udržuje součásti čisté a zabraňuje oxidaci. Zařízení nanáší jednu vrstvu za druhou a konstruuje tak součást podle CAD předlohy. Po dokončení všech vrstev jsou komponenty vyjmuty a mohou být tepelně zpracovány, obráběny nebo jinak doupraveny.²⁴ LENS technologie bývá dostupná buď v konfiguraci na klíč, nebo jako modulární tiskový nástroj, který lze integrovat do stávajících nebo nových CNC strojů. Lze tak provádět depozici kovu a obrábění na jednom zařízení.²⁴



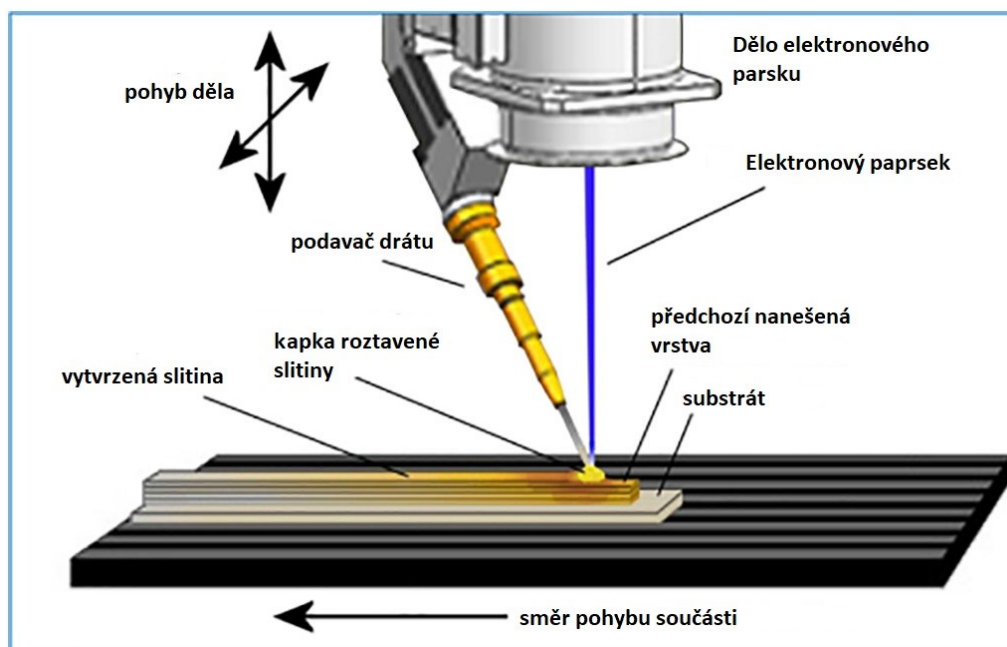
Obrázek 1.9 – Princip metody LENS¹⁵

Mezi výrobce přístrojů s technologií LENS patří společnosti OPTOMECH nebo francouzská firma BeAM.^{25, 26}

Electron Beam Additive Manufacturing (dále jen EBAM) je uplatněna ve výrobě kovových součástí s využitím drátu nebo prášku jako přídavného materiálu, který je navařován pomocí zdroje tepla v podobě elektronového paprsku, jak ilustruje obrázek 1.10. Produkce dílců probíhá stejným principem jako u technologie LENS, s tím rozdílem, že elektronové paprsky jsou daleko efektivnější než laserové a operují pouze ve vakuu. Metoda byla původně vyvíjena pro kosmické aplikace ve vesmíru.⁶

EBAM systém, jediný svého druhu, je schopný aplikovat poměrně velké množství kovu v krátkém čase.²⁹ Vysoká hustota depozice vyžaduje vhodný typ materiálu a vhodné procesní parametry.²⁷ Součásti jsou vyráběny rychleji, s menším množstvím odpadového materiálu a nižším strojovým časem oproti například SLM metodám. Technologie je schopná produkovat veliké, vysoce kvalitní kovové struktury vyrobené z titanu, tantalu niklových slitin během několika dní a s minimálním odpadem. EBAM lze využít v jakékoliv fázi cyklu životnosti produkčních součástí například k opravám nebo přepracování.²⁹

Metoda společnosti Sciaky zvládá fabrikovat kovový materiál rychlostí 3.2-11,3 kg za hodinu v závislosti na zvoleném materiálu a požadovaných vlastnostech výrobků.²⁹ Proces probíhá v hlubokém vakuu, díky čemuž je možné tisknout materiály jako titanové slitiny, které jsou citlivé na přítomnost kyslíku, jelikož do značné míry ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. Produkty tisku díky technologickému aspektu EBAM mají dokonce nižší obsah kyslíku než původní (drát nebo prášek) přídavný materiál.²⁸



Obrázek 1.10 – Schéma Sciaky principu EBAM^R technologie²⁷

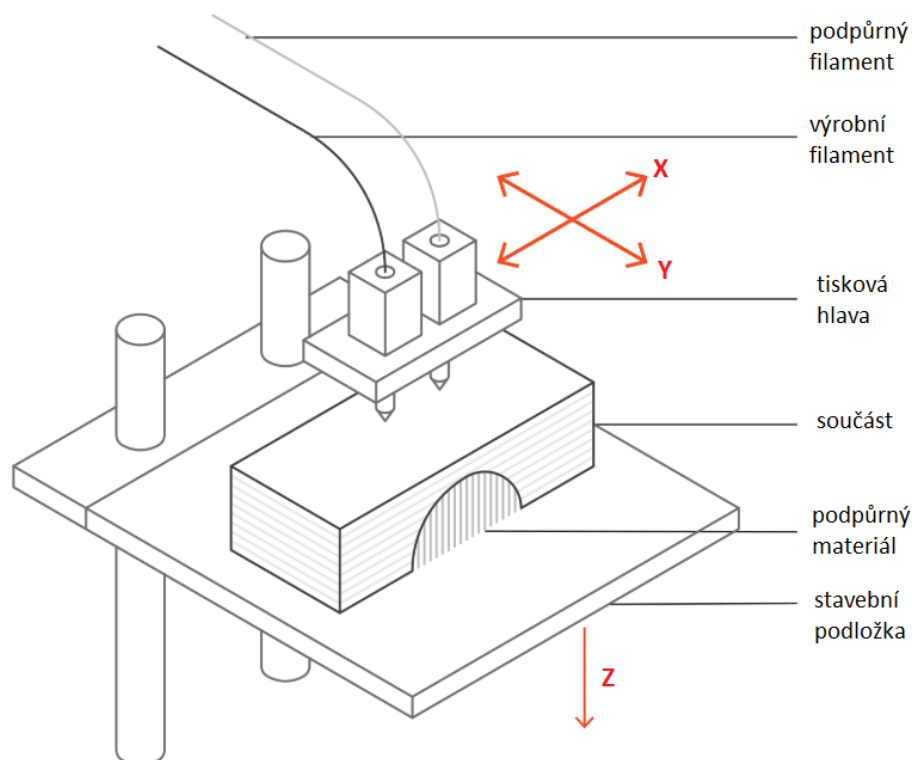


Obrázek 1.11 – Dílec vyrobený EBAM^R technikou²⁹

1.5 Vytlačování materiálu (Material Extrusion)

Poslední technologií, kterou lze vyrábět kovové dílce je AM (FDM) Vytlačování materiálu. Do odvětví tisku kovů vstoupila FDM metoda poměrně nedávno. V nejvyšší míře je známá jako jedna z nejdostupnějších technologií 3D tisku jak z pohledu nákladů, tak zastoupením. V posledních letech však s vývojem nových typů strun, které tiskárny používají jako základní materiál, přináší příslib i cenově dostupného 3D tisku kovů, dokonce i v amatérských podmínkách bez nutnosti vysokých investic do infrastruktury vybavené laserovou, elektronovou nebo jinou technologií.

Nejpoužívanější AM technologie Vytlačování materiálu (někdy také známá jako FFF- Fused Filament Fabrication) extrudují materiál skrz trysku na stavební podložku. Tryska má jasně danou trajektorii rovině X, Y a vytváří vrstvu za vrstvou. Metoda buduje dílce pomocí tuhého, ve většině případů, termoplastického vlákna, které je v podobě filamentu navinuto na cívce. Vlákno je tlačeno do zahřáté trysky o teplotě odpovídající tavení příslušného materiálu a taveno. Tiskárna kontinuálně pohybuje tiskovou hlavou obsahující trysku a pokládá roztavený materiál do přesných lokací v jedné vrstvě na podložku, přičemž následuje předem stanovenou trajektorii. Materiál ihned po aplikování začíná chladnout a tuhne. Jakmile je vrstva kompletní, posune se buď podložka nebo tisková hlava o výšku vrstvy a započne tisk další vrstvy. Součásti jsou takto stavěny vrstvu po vrstvě, dokud není hotový celý objem.⁶ Schéma tiskárny popisuje obrázek 1.12.



Obrázek 1.12 – Princip FDM technologie tisku⁶

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 1, FDM nabízí tisk velmi široké škály různorodých materiálů s rozličnými vlastnostmi. Speciálním typem jsou vlákna obsahující jemný kovový prášek navázaný v polymerním pojivu, v kontextu této práce – korozivzdorné oceli 316L. Díky této formě tiskového materiálu je bezpečné zacházet s filamentem bez ochranných pomůcek, které jsou u zejména práškových technologií nezbytnou výbavou při manipulaci. K výrobcům distribuujícím FDM technologie patří Stratasys, Ultimaker, MakerBot, PrusaPrinters, Markforged a mnoho dalších. V posledních letech se na trhu objevilo několik společností, které začaly nabízet dostupnější 3D tisk nerezových prototypů právě technologií FDM jako již zmíněná Markforged nebo Desktop Metal, které jsou uvedeny v dalších kapitolách.^{30, 31}

1.5.1 Markforged Metal X

Společnost Markforged se specializuje na tisk kompozitních materiálů technologií Continuous Fiber Fabrication (FFF/CFF). Technologie je principiálně obdobná jako FDM, ale s rozdílem, že jedním extruderem nanáší zařízení matriční materiál Onyx (Nylon s velmi krátkými karbonovými vlákny) a do něho je schopna druhým extruderem vkládat kompozitní kontinuální vlákno (kevlar, karbon, skleněné vlákno), které součásti podstatně zvýší celkovou pevnost.³⁰

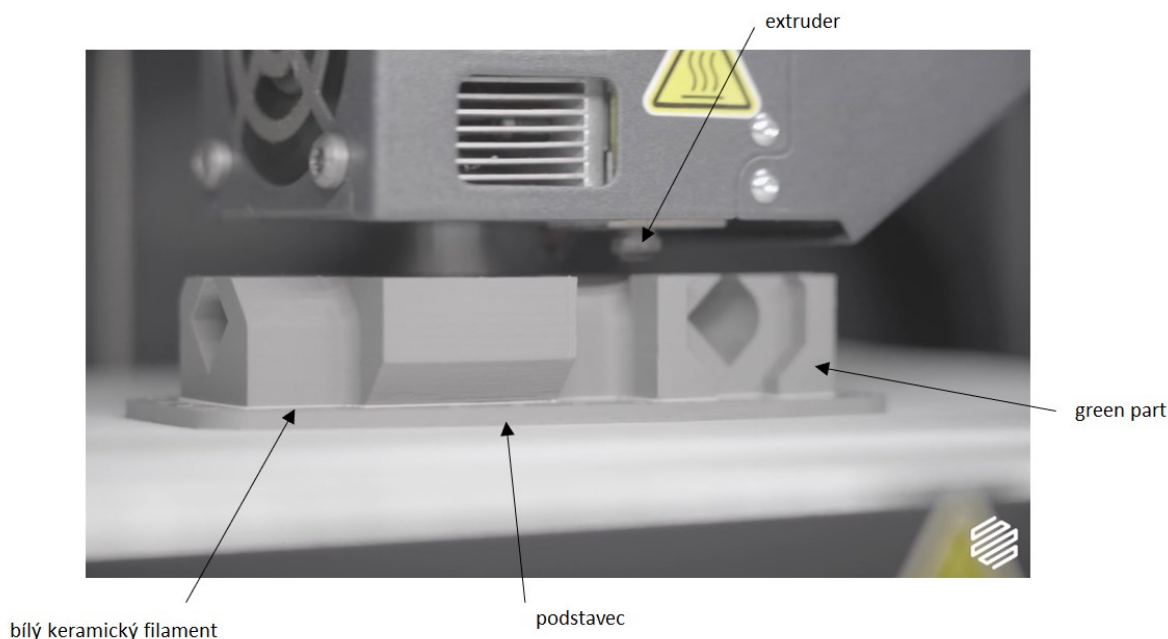
Druhou oblastí rozšiřující AM portfolio společnosti Markforged je systém Metal X k tisku kovových materiálů s technologií ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing)

vycházející z FDM metody. Před spuštěním výroby je nahrán 3D CAD model do cloudového prostředí Eiger, které model zpracuje, vloží pod součást podstavec, navrhne podpory a upraví velikosti rozměrů z důvodu smrštění způsobeného během technologického kroku slinování, v závislosti na typu kovového materiálu. Zpracovaná data odešle do tiskárny. Výroba probíhá ve třech fázích. Prvním krokem je samotný tisk ve speciálním zařízení Metal X, na obrázku 1.13 vlevo, které k tisku využívá dva materiály. Prvním z nich je kovový polymerní filament obsahující částice kovu navázané v polymerním pojivu. Druhým materiálem je uvolňovací keramický filament (tzv. keramický separátor). Před započetím pokládání vrstev proběhne automatická kalibrace polohy stavební podložky a následně započne tisk. Celé zařízení je uzavřené, se stabilní a vyhřívanou atmosférou v průběhu celé tiskové úlohy. Mezi podstavcem a součástí samotnou je aplikována vrstva keramického materiálu z důvodu snadnějšího odstranění podstavce po procesu slinování viz obrázek 1.14. Díl je tvořen jednu vrstvu za druhou stejným principem, který využívají i běžné FDM tiskárny. Po skončení tisku je komponenta, nazývána zelený díl (green part), včetně podstavce odstraněna z tiskové podložky.

Dalším krokem je praní, které má za úkol odstranit ze zelené součásti většinu polymerního pojiva. K tomu slouží další zařízení s názvem Wash-1, na obrázku 1.13 uprostřed, které pomocí proudění specifických rozpouštěcích tekutin vyplaví ze zelených dílů primární pojivo. Délka praní zelených součástí se liší v závislosti na nejtlustším místě výrobků a může trvat v řádu několika hodin až dní. Procesem dojde k přeměně zelených dílů na tzv. hnědé (brown part), které jsou již vhodné k poslednímu třetímu kroku, slinování. Slinování probíhá v peci s názvem Sinter-2, na obrázku 1.13 úplně vpravo. Proces přeměny hnědých dílů obsahujících zbytky sekundárního pojiva s nízkou hustotou na plnohodnotné kovové díly. Ze začátku stoupá v peci teplota mírně, aby došlo k odhoření zbytků sekundárního pojiva. Následně naroste teplota téměř na teplotu tavení kovového materiálu, což umožní částicím kovu spojit se v jedno tuhé těleso. Operace slinování trvá přibližně jeden den. Po vytažení z pece zůstává keramická vrstva mezi podstavcem a součástí stále v práškové nespečené formě, a díky tomu lze podstavec součásti lehce odstranit.³⁰



Obrázek 1.13 – Soubor systému MetalX (zleva) 3D tiskárna MetalX, zařízení na odstranění pojiva Wash-1 a slinovací pec Sinter-2³⁰



Obrázek 1.14 – Proces tisku na tiskárně MetalX³⁰

Mezi dostupné materiály, které společnost ve formě filamentu vyrábí a lze je na zařízeních systému MetalX tisknout, patří:³⁰

- 17-4 PH nerezová ocel
- H13 nástrojová ocel
- A2 nástrojová ocel
- D2 nástrojová ocel
- Inconel 625
- Měď
- 316L nerezová ocel (ve vývoji)
- Ti6Al4V slitina titanu (ve vývoji)

1.5.2 Desktop Metal

Společnost Desktop Metal se obdobně jako Markforged věnuje distribuci technologie založené na bázi FDM, kterou lze tisknout kompozity a kovové materiály. Soubor zařízení k výrobě kovových dílců se nazývá Studio SystemTM. Mimo jiné firma také vyrábí přístroje pro tisk kompozitních materiálů s názvem FiberTM. Dalšími jsou systémy Shop SystemTM a Production SystemTM, oba využívající AM technologii tryskání pojiva, z nichž je první určený k produkci menších sad dílců a druhý pro sériovou a velkoobjemovou výrobu.³¹

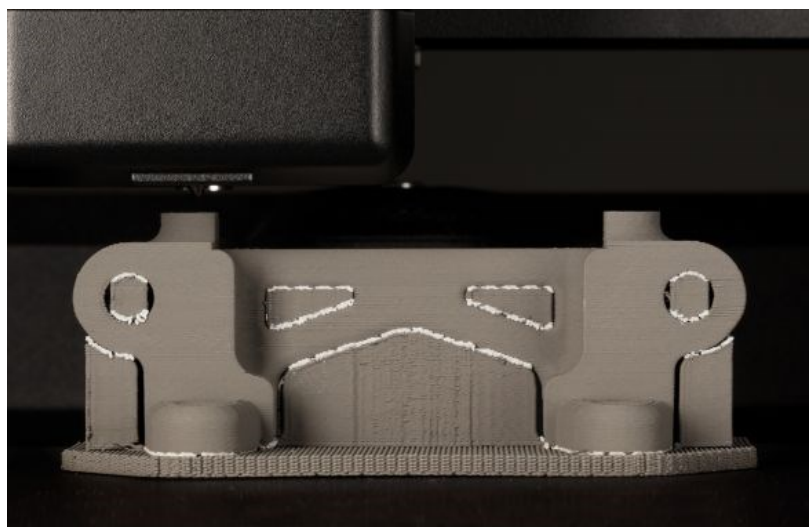
Studio SystemTM je dle výrobce 10x levnější než existující technologie 3D tisku kovů. Tiskárna využívá technologii Bound Metal Deposition (BMD) k výrobě přesných a opakovatelných prototypů, podobnou cestou jako FDM tiskárny na termoplasty.³⁴ Tisková hlavička používá dva extrudery. Prvním vytlačuje tištěný materiál a druhým keramický separátor, který pomáhá k snadnému odstranění podpor a podstavce tištěných dílů

po slinování.³¹ Výhodami metody jsou lokální oddělitelné podpory umožňující ruční odstranění podpěrných struktur a výměnné tiskové kazety viz obrázek 1.15, které přispívají k bezpečnějšímu a rychlejšímu provádění výměny tištěného materiálu. Desktop Metal Studio SystemTM umožňuje zpracovávat celou škálu materiálů.³⁴ Mezi materiály k tisku patří 17-4 nerezová ocel, 316L nerezová ocel, H13 nástrojová ocel, slitina 4140, Slitina 625 a měď.³¹



Obrázek 1.15 – Tisková kazeta s tyčinkami materiálu³¹

Na rozdíl od PBF systémů, které selektivně taví kovový prášek, tiskárna extruduje navázaný kov v pojivu, který je přiváděn do trysky ve formě tyčinek v uzavřené vyměnitelné kazetě. Stejně jako u FDM technologie dochází k protlačování základního materiálu skrze trysku a pokládání na tiskovou podložku po předem dané trajektorii. Tato AM výrobní metoda eliminuje nezbytnost bezpečnostních prvků jako jsou ochranné oděvy a respirátory obsluhy. Další výhodou je možnost tisku dílů s pouze částečnou výplní, která je běžně používána u FDM tiskáren.³¹



Obrázek 1.16 – Green part po vytištění na tiskárně systému Studio SystemTM s patrnými místy (bílý materiál), ve kterých je vytištěn keramický separátor.³¹

Po vytištění, kterým vznikne green part, následuje podobně jako u systému Markfoged vyplavování pojiva v dalším ze sady zařízení. Zelené součásti jsou připraveny na proces slinování rozpuštěním primárního pojiva. Integrovaná automatická destilace a recyklace tekutin v zařízení znamená, že není potřeba mezi cykly tekutiny doplňovat.

Z green partu získaný brown part je připravený k závěrečnému procesu slinování. To probíhá v peci, která je plně automatická a vhodná i do kancelářského prostředí. Vestavěné teplotní profily zajišťují optimální výsledky pro každý materiál zvlášť a zamezení vzniku zbytkových napětí přítomných u PBF technologií. Maximální teplota cyklu může dosahovat až 1400 °C.³¹



Obrázek 1.17 – Sestava zařízení produkčního systému Desktop Metal Studio System™ (zleva) tiskárna, vyplavovací zařízení, slinovací pec³¹

1.5.3 BASF Ultrafuse

Společnost BASF uvedla na trh v polovině minulého roku 2019 kompozitní vlákno vhodné pro technologii 3D tisku FDM kovových slitin ze struny navinuté na cívce viz obrázek 1.18. Jedná se o materiál Ultrafuse 316L (DIN 1.4404).





Obrázek 1.18 – cívka s materiálem BASF Ultrafuse 316L

Filament vykazuje vysoký obsah (90 %) kovu a rovnoměrné rozložení částic kovového prášku v polymerní termoplastické matrici. V důsledku imobilizace částic prášku v pojivové matrici vlákna dramaticky klesá potenciační bezpečnostní riziko, které se vyskytuje při zacházení s velmi jemnými kovovými prášky. V porovnání s PBF technologiemi jako SLM je zacházení s přidavným tiskovým materiálem o mnoho bezpečnější a nevyžaduje specializované ochranné pomůcky.³⁷ Kovo-polymerní kompozitní filament k produkci kovových výrobků má oproti výrobcům Markoforged a Desktop Metal výhodu, jelikož je bez větších obtíží tisknutelný na všech standardních FDM zařízeních. Oproti konkurenčním materiálům nabízí další výhodu ve využívání průmyslově standardizovaného postupu odstraňování pojiva a slinování, kterým lze zpracovávat green a brown party.³⁶

Filament je vyráběn ve dvou standardizovaných průměrech $1,75 \pm 0,05$ mm (250 m na cívce) a $2,85 \pm 0,075$ mm (95 m na cívce). V obou případech je hmotnost materiálu cívky 3 kilogramy.³⁶

Tabulka 1 – Mechanické vlastnosti filamentu po slinování uváděné výrobcem³⁶

	¹ Tvar vzorku dle DIN 50125		
	² Poddimenzovaný vzorek nárazového testu dle DIN EN ISO 148-1		
Směr tisku	Standard	XY	ZX
Orientace		plochá	vzpřímená
Mez pevnosti	DIN EN ISO 6892-1 ¹	561 MPa	521 MPa
Mez kluzu, $R_{p0,2}$	DIN EN ISO 6892-1 ¹	251 MPa	234 MPa
Prodloužení	DIN EN ISO 6892-1 ¹	53 %	36%
Vrubová houževnatost (Charpy)	DIN EN ISO 148:2017-05 ² (2 mm V-vrub)	111 J.cm ⁻²	-
Tvrdost (Vickers)	DIN EN ISO 6507-1	128 HV10	128 HV10

Tabulka 2 – Obecné vlastnosti materiálu Ultrafuse 316L³⁶

Obecné vlastnosti		Standard
Hustota slinovaného dílu	7,85 g.cm ⁻³	ISO 1183-1

Výroba probíhá ve třech fázích:

- 1) 3D tisk – green part
- 2) Odstranění pojiva (debinding) – brown part
- 3) Slinování (sintering) – white part

Další pomyslnou fází mohou být postprocesní úpravy obráběním, tepelným zpracováním, broušením, lepením svařováním atd.

Během **první fáze** je kompozitní vlákno protlačováno přes extruder a je nanášeno ve vrstvě o výšce 0,15 mm na vyhřívanou tiskovou podložku, čímž postupně vrstvu za vrstvou vzniká green part. Průměr trysky doporučuje výrobce filamentu alespoň 0,40 mm, protože parametr zásadně ovlivňuje kvalitu (detaily) a celkový tiskový čas. Tištěný díl by měl mít alespoň 1-2 okrajové linie s překryvem 20-35 % a výplň v rozsahu 60-100 % ve tvaru včelí plástve. Doporučená tisková teplota trysky se nachází v rozmezí 230-250 °C, tiskové podložky pak v rozsahu 90-120°C. Nemělo by být používáno chlazení větrákem v tiskové hlavě. Výrobce dále uvádí optimální retrakční rychlost 45 mm.s⁻¹ s rozdílnou vzdáleností v závislosti na typu přívodu vlákna do extruderu (direct/bowden) 1,5/5,0 mm. Rychlost tisku by neměla překročit hodnotu 35 mm.s⁻¹. Jako při běžném FDM tisku termoplastů platí běžné zásady technologičnosti konstrukce a je potřeba počítat s převisy, které vyžadují přidání podpor.³⁷

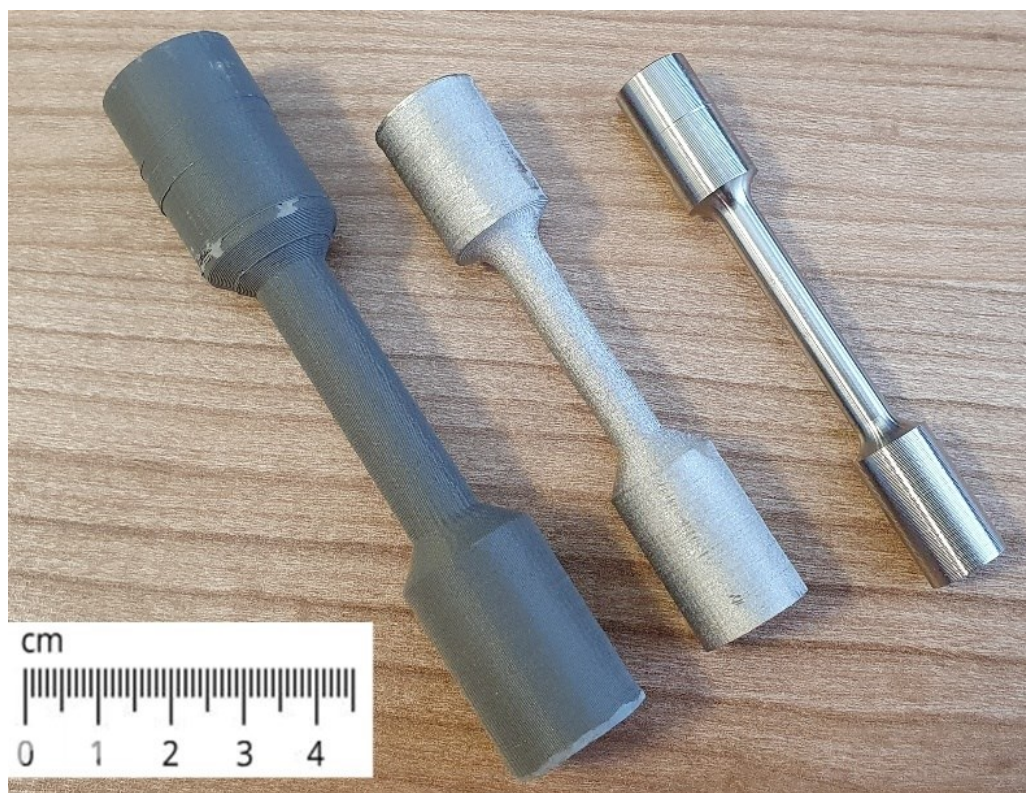
Z vytištěných dílců (green partů) je v **druhé fázi** výroby potřeba odstranit polymerní pojivo. Materiál Ultrafuse 316L obsahuje více systémů pojiv, které zaručují rychlé a kontrolované odstranění především primárního typu pojiva. Pojivo, které umožňuje celý proces 3D tisku, je odstraňováno katalytickým procesem napařování v parách kyseliny.³⁷ Odstraňování pojiva, dle procesu navrženého výrobcem filamentu BASF, probíhá při 120 °C v atmosféře kyseliny dusičné (HNO₃ > 98 %).³⁵ Rychlost katalytického odstraňování je v rozmezí 1-2 mm.h⁻¹ pro externí povrchy.³⁷ Formaldehyd, který se uvolňuje během procesu ze součástí, může reagovat s oxidačními činidly. Limitní hodnota exploze formaldehydu při kontaktu s kyslíkem je 4,5 % objemu. Existují náznaky, že se může vyskytovat pomalá reakce mezi kyselinou dusičnou a formaldehydem, a proto je nezbytné se vyhnout jakékoliv vysoké nezamýšlené dávce kyseliny dusičné. Proces odstraňování pojiva je ukončen ve chvíli, kdy je dosaženo minimální hodnoty ztráty pojiva 10,5 %. Při použití 50 l pece na odstranění pojiva je kyselina dusičná dodávána typicky v množství 30 l.h⁻¹ a proplachovací plyn (dusík) v množství s průchodností až 500 l.h⁻¹. Uvedené parametry procesu byly prokázány jako bezpečné.³⁵ Po procesu odstranění se z green partů stávají brown party, které jsou již vhodné ke konečnému zpracování slinováním v peci. Tvar dílců a soudržnost částic kovového prášku zajišťují zbytky sekundárního pojiva. Dílce jsou relativně porézní a k transformaci v tuhé výrobky vyžadují slinování.³⁵

Třetí fáze slinování konsoliduje a formuje tuhé zahuštěné dílce pomocí tepelné energie, aniž by docházelo k tavení materiálu. Proces probíhá v atmosféře 100% čistého a suchého vodíku (rosný bod – 40 °C) nebo argonu (rosný bod – 40 °C). Pro 99,6% čistotu výrobků je doporučeno použít podpory z Al₂O₃.

Typický cyklus slinování se skládá z navazujících kroků:³⁵

- pokojová teplota – 5 K/min – 600 °C, výdrž na teplotě po dobu 1 h,
- 600 °C – 5 K/min – 1380 °C, výdrž na teplotě po dobu 3 h,
- přirozené chladnutí pece.

V prvotních fázích procesu slinování jsou zbytky složek pojiva spáleny a produkty pyrolýzy by měly být odstraněny pomocí sacího ventilátoru. Odstraňování zkondenzovaných produktů pyrolýzy ze stěn slinovací pece by mělo být prováděno v ochranných laboratorních rukavicích. Za určitých okolností se mohou ve slinovací peci tvořit ložiska obsahující MnO. Tato sloučenina může tvořit vláknům podobné morfologie, které mohou způsobit zdravotní ohrožení. Je tedy důrazně doporučeno zamezit tvorbě prachu při odstraňování hotových dílů tzv. white partů z komory pece a používat ochranné masky a respirátory třídy FFP3.³⁵



Obrázek 1.19 Vzorky pro tahovou zkoušku vyrobené z materiálu Ultrafuse 316L (DIN 1.4404) – zleva: green part, white part, vzorek po obrobení

Jak je patrné z obrázku 1.19, součásti, které projdou zpracováním odstranění pojiva a slinováním, zmenší svůj objem. Volba orientace součástí při 3D tisku je v tomto směru velmi důležitou skutečností, jelikož ovlivňuje výsledek po anizotropním smrštění, které vzniká jako důsledek procesů slinování a odstraňování pojiva. Výrobce BASF uvádí, že průměrné smrštění je v osách XY 16 % a v ose Z 20 %.

Hnědé součásti (brown party) jsou složeny z pevně zabaleného kovového prášku. Během slinování se kovové částice sloučí, což zapříčiní redukci velikosti dílce. K výpočtu smrštění se užívají rovnice a vztahy (rovnice 1-8), které je potřeba brát v potaz již při navrhování součástí a přípravě dat pro tiskárnu.

Typické smrštění a nadměrný faktor pro Ultrafuse 316L:³⁷

$$S_x \approx S_y = 0.16 \text{ nebo } 16 \% \quad (1)$$

$$S_z = 0.2 \text{ nebo } 20 \% \quad (2)$$

kde S je smrštění (míra redukce mezi green partem a white partem)

$$OFS_x \approx OFS_y = 1.20 \text{ nebo } 120 \% \quad (3)$$

$$OFS_z = 1.26 \text{ nebo } 126 \% \quad (4)$$

kde OFS je oversizing factor (nadměrný faktor, hodnota zvětšení green partu, potřebná k získání požadovaného rozměru white partu)

K přepočtu mezi smrštění, nadměrného faktoru a zpět jsou užívány vztahy:

$$S = 1 - \frac{L_s}{L_g} \quad (5)$$

$$OFS = \frac{L_s}{L_g} \quad (6)$$

$$OFS = \frac{1}{1-S} \quad (7)$$

$$L_g = \frac{L_s}{1-S} \quad (8)$$

kde ... L_s ... je délka slinuté součásti (mm) a ... L_g ... délka zelené součásti-green partu (mm)

Pokud to umožňují podmínky, měly by dílce být katalyticky napařovány a slinovány vždy v poloze, ve které byly vytištěny.³⁵ Hotové white party se dále mohou obrábět, omílat, tryskat, svařovat, lepit, brousit atd.

2 Mikrostrukturní charakteristika

Nápad použít technologii FDM k produkci kovových dílů byl poprvé prezentován v roce 1996 s typem oceli 17-4PH.³⁹ Proces byl později pojmenován jako FDMet s více detailněji zaměřeným výzkumem, který publikoval WU a kolektiv.⁴⁰ Studie byla zaměřena na vysvětlení procedur přípravy vstupní suroviny (pojiva), optimalizaci FDM procesu za účelem zisku plné hustoty vyráběných vzorků a demonstraci, že mohou být díly s komplexní geometrií vyráběny s dostatečnou geometrickou přesností. Práce byla současně věnována krátkému popisu procesů odstraňování pojiva a slinování.⁴⁰ Když v předcházejících letech před rokem 2009 některé ze zásadních patentů dosáhly expirace, začaly se vědecké práce zaměřovat především na vlastnosti filamentu a na požadavky optimální extrudovatelnosti při vysokém obsahu kovových částic ve vláknu a současně zajištění nezbytných mechanických vlastností, zejména pevnosti kovových částic 316L nerezové oceli, 17-4PH, Ti6Al4V, NdFeB, keramik a cermetů. Málo detailních studií se však, až na pár výjimek, věnovalo vlastnostem součástí po procesu slinování.³⁹

Gong a kol. se ve své studii zabývali porovnáním materiálových vlastností vzorků vyrobených z filamentu Ultrafuse 316LX metodou FDM a vzorků z nerezové oceli 316L vytištěných technologií SLM. U vzorků byla změřena a porovnána hustota a porozita, proveden metalografický rozbor, změřeny tahové charakteristiky a tvrdost dle Rockwella.⁷

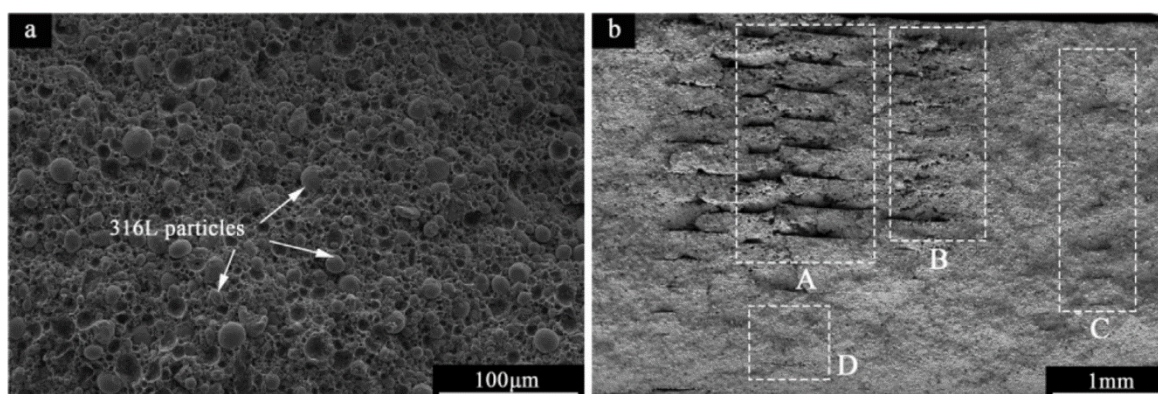
Thompson a kolektiv provedli studii zkoumající vzorky vytištěné na standardní hobby tiskárně Prusa i3 MK2 z materiálu Ultrafuse 316LX. Práce prokazuje, že vysoce plněný kovový filament, z něhož bylo odstraněno pojivo jednoduchou cestou v laboratoři a byl slinován v cenově dostupné vakuové peci, lze použít pro výrobu čistých metalických komponent s poměrně vysokou hustotou.³⁹ Prezentované výsledky ukazují, jak je finální hustota ovlivněna rychlostmi zahřívání a teplotami pece během termálního odstraňování pojiva a kroku slinování. Demonstrují, že je možné dosáhnout zvýšení hustoty finálních výrobků optimalizací parametrů procesu. Proces slinování v tomto případě neprobíhal v atmosféře redukčního plynu vodíku, ale ve vakuu pod tlakem 10^{-3} mbar, z důvodu zamezení oxidaci částic. Po vytištění následovaly důležité kroky odstranění pojiva a slinování, při kterých bylo nutné precizně řídit teplotní hodnoty, aby nedošlo ke vzniku nežádoucích defektů. Slinování probíhající po dobu 120 minut při teplotě 1360 °C způsobilo finální zahuštění struktury a eliminaci pórů. Bylo zaznamenáno 16,3% smrštění na šířku a 17,4 % na výšky vzorků.³⁹

2.1 Popis mikrostruktury

Obrázek 2.1 zobrazuje snímek mikrostruktury řezu kompozitního vlákna materiálu Ultrafuse 316L, které je používáno při FDM tisku, získaný rastrovacím elektronovým mikroskopem. Pojivo ve filamentu formuje kontinuální fázi a různé velké částice 316L oceli

jsou rovnoměrně rozptýlené v matrici. Šipky na obrázku 2.1a označují pár z mnoha dalších mikroskopických sférických částic. Jelikož plní pojivo hlavní roli v procesu tisku, nejsou požadavky na morfologii rozptýlených kovových částic, včetně nároků na sféricitu, tekutost a rozčlenění velikosti částic tak vysoké, jako tomu bývá u ostatních metod 3D tisku kovů například SLM.^{38,39} Z těchto důvodů lze kovové částice použité ve filamentu pro AM metodu FDM poměrně snadně zpracovat. Ze stejného důvodu lze pro techniku FDM použít jakýkoliv jiný kovový materiál než nerezovou ocel 316L, který splňuje podmínku vyššího bodu tání než 300 °C.

Na obrázku 2.1 v části b je zobrazen řez green partem. Jelikož nemůže vláknitý extrudovaný kompozit z trysky plně splynout s již deponovanou spodní vrstvou, objevují se většinou otvory ve tvaru štěrbin, které lze přisoudit rychlému vytvrzení právě extrudovaného nataveného materiálu. Vzorec přímočaré výplně byl nakloněn pod úhlem 45° k horizontální rovině, a proto jsou mezery v tisku v oblastech A a B delší než v perimetru C. Navíc může software (slicer) pro rozvrstvení modelu, který zpracuje digitální CAD model na jednotlivé vrstvy, nastavit několik prvních vrstev jako pevné, což vede k mnohem menším a štíhlejším mezerám mezi vlákny v zóně D.³⁸

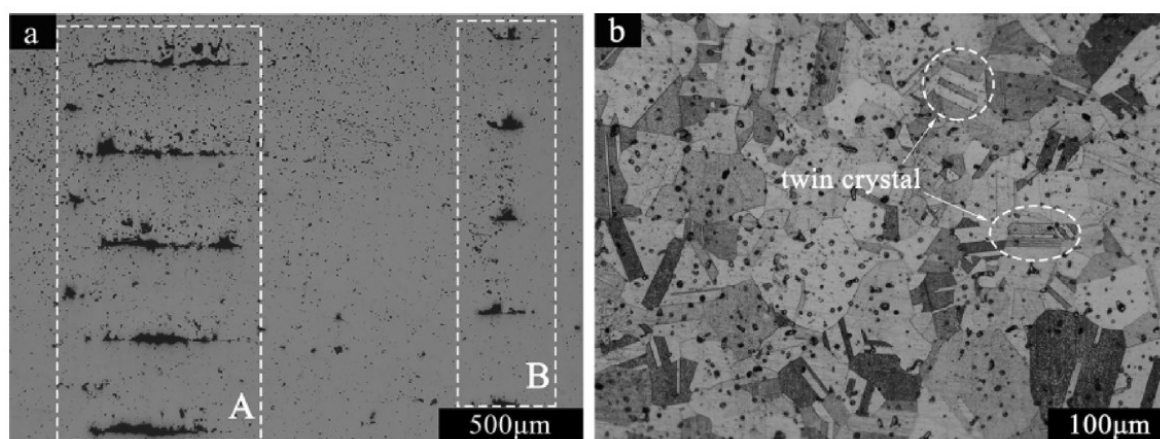


Obrázek 2.1 – SEM snímky řezů a) filamentu a b) green partu³⁸

Další obrázek 2.2 zobrazuje mikrostrukturu součásti z oceli 316L vytištěnou technologií Vytlačování materiálu po procesu odstraňování pojiva a slinování. Póry jsou zformovány a rovnoměrně rozloženy na mikro úrovni přes celý průřez a většina z nich je přednostně sférických. Nepatrné tiskové mezery v okrajích green partu (zóna C na obrázku 2.1b) a spodních vrstvách (perimetr D na obr. 2.1b) byly během procesu slinování zaceleny. Ačkoliv jsou tiskové mezery stále pozorovatelné v oblastech s relativně velkými mezerami (A a B obr. 2.2a), došlo během průběhu slinování k jejich smrštění a jsou o mnoho menší než v původním green partu. Větší tiskové mezery v zóně A se změnily na uzavřené úzké trhliny, menší mezery v zóně B se transformovaly do nepravidelných pórů s rozměry v řádu několika desítek mikrometrů. Přirozené vady, obzvláště tiskové mezery, se stávají potenciálními zdroji vzniku trhlin, což přispívá ke snížení pevnosti FDM tištěných součástí.³⁸

Dle Archimédovy metody změřená hodnota hustoty FDM vytištěných vzorků z oceli 316L byla $7,36 \text{ g/cm}^3$, což ukazuje že relativní hustota (aktuální hustota/teoretická hustota) je 92,23 % a porozita je 7,77 %. Pro kovové součásti je takové procento porozity příliš vysoké, na druhou stranu nabízí možnost redukce hmotnosti při ne moc snížených mechanických vlastnostech. Po odstranění pojiva nebyly pozorovány žádné evidentní změny geometrie vzorků. Green party jsou izotropní a mají homogenní složení, protože součást po procesu slinování nemění svůj tvar, pouze dochází k její smrštění.³⁸

Po slinování vzniká plně austenitická struktura s dvojími krystaly (obr. 2.2b). Zdvojené krystaly způsobují zvýšení tvrdosti a pevnosti FDM tištěné součásti.³⁸



Obrázek 2.2 – Optická mikroskopie mikrostruktury FDM tištěné 316L součásti³⁸

Mikro tvrdost dle Vickerse slinovaných vzorků z oceli 316L byla o trochu nižší ($145,2 \pm 6,7 \text{ HV}$) než u typu válcované oceli AISI 316L (155 HV) a znatelně nižší než u SLM tištěných součástí (232 HV). Dvojitě krystaly zformované během slinování (obr. 2.2) sice mohou zvyšovat tvrdost, ale relativně vysoká porozita naopak dramaticky snižuje celkovou tvrdost, a to z důvodů, že součásti s póry nebo tiskovými mezerami mohou být poměrně snadno stlačeny hrotem měřícím mikrotvrdost.³⁸

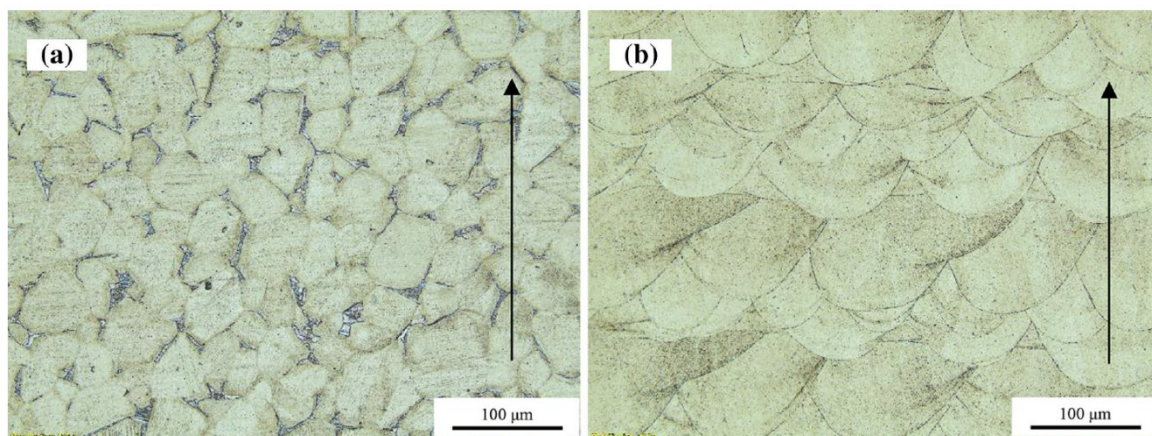
Tahové mechanické vlastnosti vykazují v porovnání se vzorky vyrobenými SLM technologií nižší čísla v mezi kluzu, mezi pevnosti v tahu, prodloužení, v nejvyšší míře pak v celkové mezi pevnosti.^{7,38}

Tabulka 3 – Tahové vlastnosti vzorků rozdílných metod výroby oceli 316L⁷

Tahové vlastnosti	FDM SS 316L	ASIS typ SS 316L	SLM SS 316L
Mez kluzu (MPa)	167	205	541
Mez pevnosti v tahu (MPa)	465	515	648
Prodloužení (%)	31	60	30
Youngův modul (GPa)	152	193	320

Srovnání mikrostruktury FDM a SLM tištěné slitiny 316L zobrazuje obrázek 2.3. Po odstranění pojiva z FDM vytištěných vzorků na obrázku 2.3 následovalo slinování, které probíhalo v atmosféře plynného vodíku za účelem zvýšení hustoty brown partů. V atmosféře čistého vodíku nebo úplného vakua podstoupí malá zrnka rekrystalizaci, rostou a formují soubor vyrovnaných zrn bez vnitřního napětí. Z obrázku 2.3a je zřejmé, že austenitická slinovaná nerezová 316L slitina vykazuje přibližně stejnou velikost zrn ve všech směrech. Velikost zrn závisí jak na délce, tak teplotě slinování. SLM tištěná nerezová 316L ocel (obr. 2.3b) vykazovala plnou gamma austenitickou fází obsahující subzrna, přičemž se velikost zrn zvyšovala se zvětšujícím se výkonem laseru. Bohaté hranice subzrn s vysokou koncentrací dislokací přispívají k dobré plasticitě.⁷

Tvary zrn FDM 316L oceli jsou nezávislé na směru tisku. Všechna zrna byla uspořádána uniformně, což indikuje izotropní mechanické vlastnosti vzorků. Na mikrostruktuře SLM 316L vzorků jsou jasně viditelné jednotlivé tavné lázně (melting pool) způsobené průchodem paprsku laseru. Orientace tavných lázní naznačuje, že materiálové vlastnosti SLM vzorků budou mít anizotropní chování.⁷



Obrázek 2.3 – Porovnání mikrostruktury FDM a SLM vzorků⁷

Materiálové zkoušky prokázaly, že FDM tištěná ocel 316L vykazuje nižší mez pevnosti než ocel vytištěná metodou SLM. Hlavní mechanické vlastnosti jsou současně nižší, než konvenčně vyráběné oceli 316L (žíhaného materiálu). Zahrnutí inherentní porozity může zhoršovat tažnost materiálu kvůli lokálním koncentrátorům napětí a z toho důvodu byla tažnost slinované oceli 316L naměřena nižší než u konvenčně vyráběné 316L oceli (31 % vs 60 %).⁷

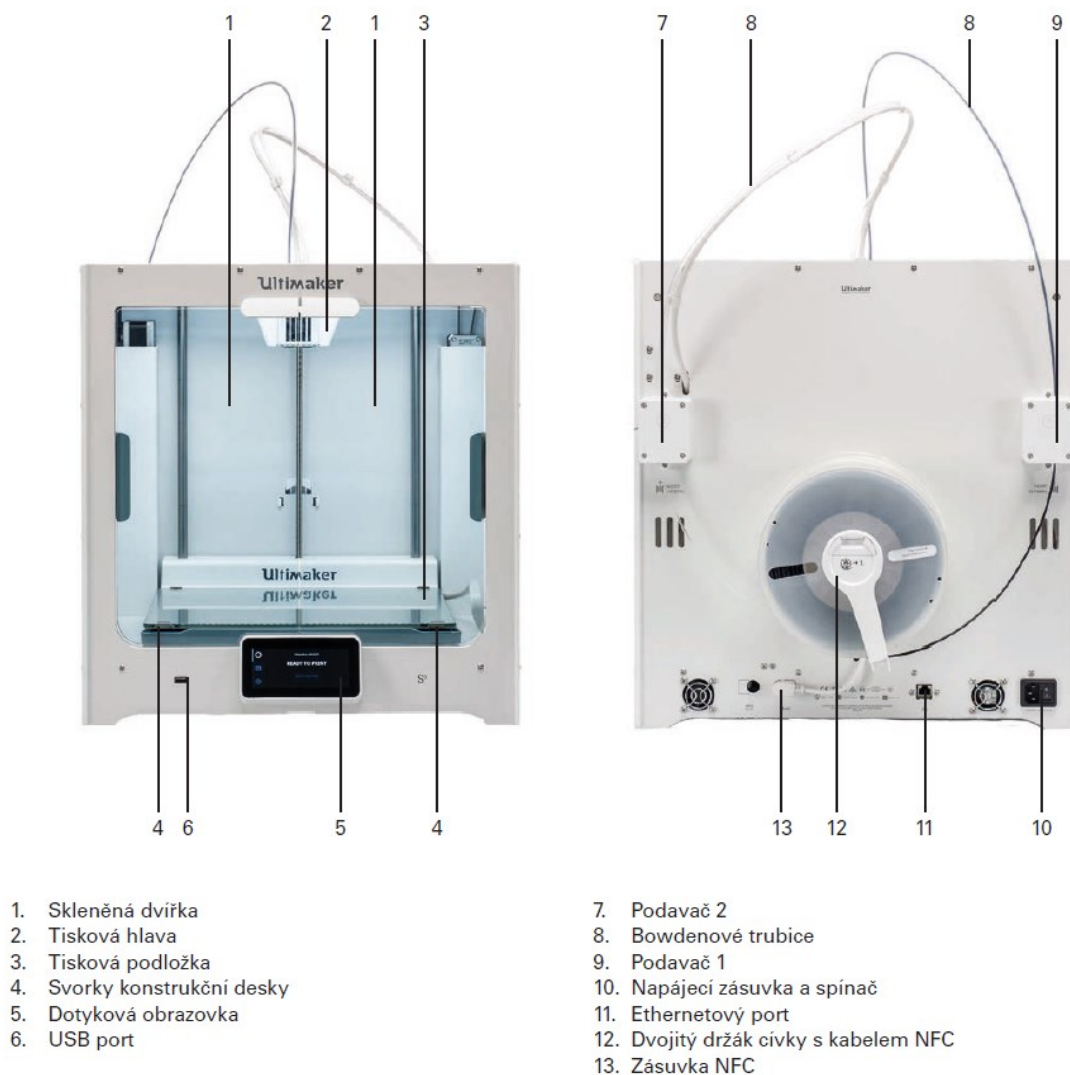
Výška vrstvy, rychlost tisku a teplota trysky extrudéru jsou kritickými parametry pro tavení, extruzi a depozici Ultrafuse filamentu. Jelikož jsou souvislé mezery součástí tištěného green partu, nelze FDM procesem tisknout plně husté díly. Hustota vzorků vyrobených technologií FDM byla pouze (7,88 g/cm³), ve srovnání se vzorky SLM (8 g/cm³) a AISI typu nerezové oceli 316L 8 g/cm³. Porozita FDM vzorků nerezové oceli 316L byla tedy zhruba 1,5 %, zatímco u stejného materiálu fabrikovaného metodou SLM byly vzorky téměř plně husté bez vyššího procenta porozity.⁷

Z důvodů vysoké hustoty dislokací na hranicích subzrn, se dislokace vzájemně zastavují a brání svému vzájemnému pohybu krystalografickou mřížkou. Z tohoto důvodu mají SLM vzorky vyšší mez pevnosti a lepší mechanické vlastnosti. Současně jsou však tyto hodnoty podstatně méně ovlivněny porozitou, která je v porovnání s FDM téměř zanedbatelná. Zkoušky pevnosti dle Rockwella vykazovaly, obdobně jako mechanické vlastností, nižší hodnoty pro FDM vyrobenou ocel ve srovnání s konvenční a SLM tištěnou ocelí 316L.⁷

3 Příprava vzorků pro experimenty

3.1 Tiskárna Ultimaker S5

Vzorky byly připraveny z materiálu BASF Ultrafuse 316L pomocí zařízení Ultimaker S5. Tato stolní 3D tiskárna nizozemského výrobce nabízí snadné ovládání, velký stavební objem komory a přesnost vytištěných součástí, která odpovídá průmyslové třídě kvality. Tisková hlava s dvěma extrudery poskytuje flexibilitu při používání různých typů materiálů a jejich vzájemného kombinování během jedné tiskové úlohy.⁴³ Tiskárnu lze provozovat v kancelářském prostředí a nabízí široké možnosti od rychlého prototypování až po tisk nástrojů a funkčních dílů na míru. Je určena k neustálému provozu, na který lze dohlížet i vzdáleně pomocí webové aplikace a integrované kamery promítající online přenos z tiskového prostoru tiskárny.⁴²



Obrázek 3.1 – Popis 3D tiskárny Ultimaker S5⁴¹

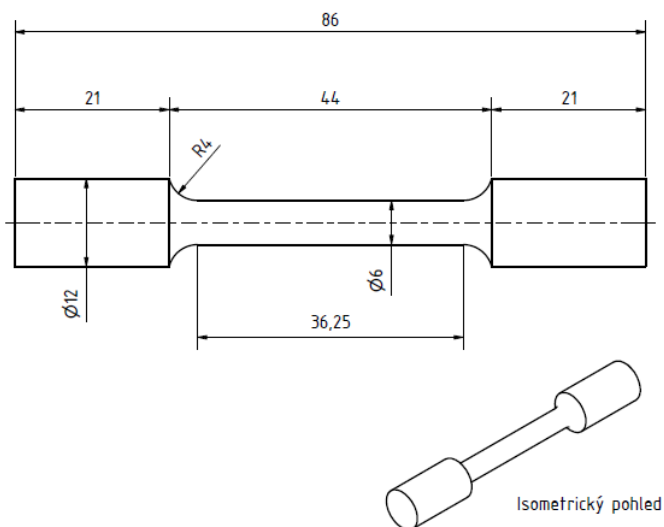
Další a podrobnější specifikace tiskárny Ultimaker S5 jsou uvedeny v tabulce 4. Tiskárna je vyráběna i v kombinaci s materiálovou stanicí a zakrytováním, které udržuje stabilní atmosféru v procesní komoře během tisku.⁴² Jak materiálová stanice, tak zakrytování jsou volitelný doplňkový sortiment a k vlastnímu chodu tiskárny nejsou nezbytné.

Tabulka 4 – Technické specifikace zařízení Ultimaker S5⁴¹

Vlastnosti tiskárny a tisku	Technologie	Technologie tavení filamentu (FFF)
	Tisková hlava	Hlava s dvěma vyměnitelnými jádry se zdvihacím mechanismem
	Konstrukční objem	XYZ: 33 x 240 x 300 mm
	Průměr filamentu	2,85 mm
	Rozlišení vrstev	Tryska 0,25 mm: 60 až 150 µm Tryska 0,4 mm: 20 až 200 µm Tryska 0,8 mm: 20 až 600 µm
	Rozlišení XYZ	6,9; 6,9 2,5 µm
	Konstrukční rychlost	<24 mm ³ .s ⁻¹
	Tisková podložka	Vyhřívaná skleněná podložka Vyhřívaná hliníková podložka
	Teplota konstrukční desky	20-140 °C
	Vyrovňování konst. desky	Aktivní vyrovňování
	Typ podavače	S dvojitým převodem, odolný proti odírání
	Průměr trysky	0,25 mm, 0,4 mm, 0,8 mm
	Teplota trysky	180-280 °C
	Zahřívací doba trysky	<2 min
	Zahřívací doba konst. desky	<4 min (od 20 do 60 °C)
	Provozní hluk	50 dBA
	Jmenovitý výkon	500 W
	Rozpoznávání materiálu	Autom. rozpoznávání pomocí skeneru NFC
	Konektivita	Wi-Fi, LAN, USB port
	Displej	Barevná dotyková obrazovka 4,7“
	Monitorování	Živý přenos (PC nebo aplikace)
Fyzické rozměry	Rozměry	495 x 457 520 mm
	Čistá hmotnost	20,6 kg
	Přepravní hmotnost	29 kg
Okolní podmínky	Provozní okolní teplota	15-32 °C, relativní vlhkost 10-90 %
	Neprovozní teplota	0-32 °C
Software	Dodaný software	Ultimaker Cura Cura Connect
	Podporované OS	MacOS, Windows, Linux
	Začlenění pluginů	SolidWorks, Siemens NX
	Typ souborů	STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, PNG

3.2 Zpracování modelu a příprava tiskových dat

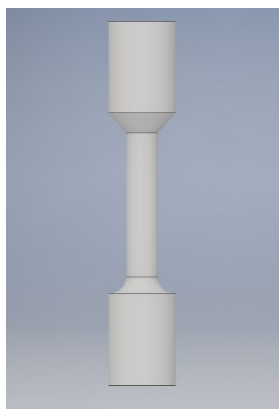
Digitální model vzorků optimalizovaný pro technologii 3D tisku FDM byl vytvořen pomocí softwaru Autodesk Inventor 2019. Tvar a rozměry zkušebních těles byly navrženy v souladu s normou ČSN 42 0363 tak, aby vyhovovaly nárokům na zkoušení materiálových vlastností.



Obrázek 3.2 – Výkres vzorku pro zkoušení

Vzhledem k tomu, že vzorky po procesu slinování zmenší z důvodů smrštění svoji velikost, bylo nezbytné zahrnout v potaz potřebné procento smrštění ve všech osách (XYZ) a přidavek na obrobení. Z těchto důvodů byly modely green partů optimalizovány každý zvlášť pro tisk ve vertikální a horizontální orientaci vzorků.

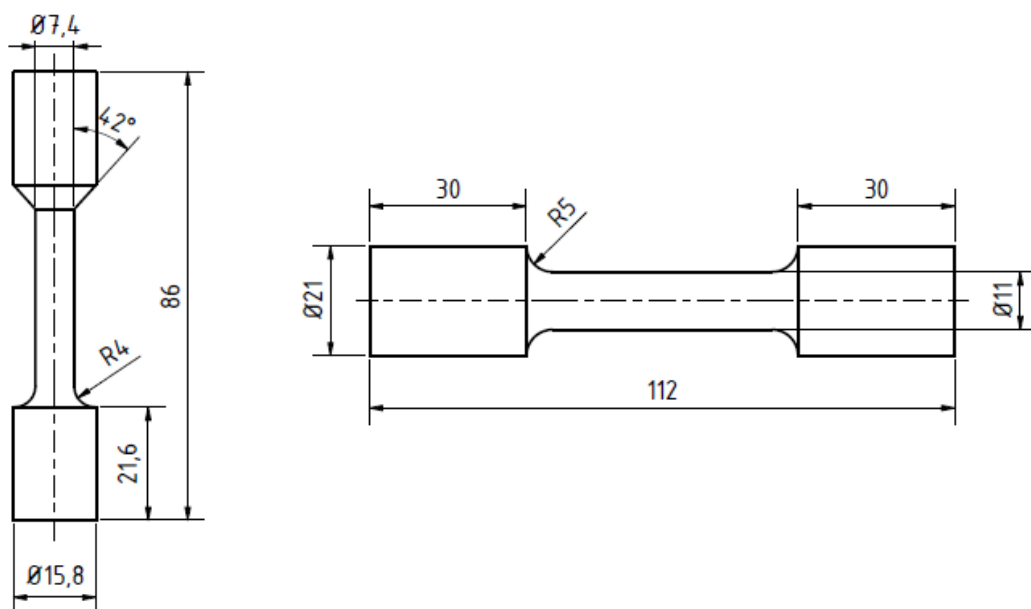
Na obrázku 3.3 je digitální model vzorku, technologicky přizpůsobeného pro tisk ve vertikální poloze, kdy osa Z prochází jeho osou. V horní části zúžení bylo použito zkosení pod úhlem 42° místo zaoblení, aby nebylo nutné tisknout podpory. Pokud by byl vzorek symetrický a místo zkosení obsahoval zaoblení, nebylo by možné vzorek vytisknout bez podpor, jelikož by převis přesahoval technologickou hranici 45° . Z těchto důvodů byly provedeny změny geometrie.



Obrázek 3.3 – Vertikální vzorek přizpůsobený pro bezpodporový FDM tisk

Tisk vzorků v horizontální poloze žádnou geometrickou změnu nevyžadoval, jelikož prostřední zúženou část nebylo možné nijak geometricky a symetricky upravit, aby nebylo nutné použít podpůrných struktur.

Dalšími úpravami modelu byl přídavek na obrábění a přepočet rozměrů v osách XY a Z z důvodů smrštění vznikajícího během slinování. Na obrázku 3.4 je v levé části technologicky upravený vertikální vzorek s přídavkem na obrábění po celém průměru tyčinky. V pravé části obrázku je pak vzorek pro tisk v horizontální poloze již s přepočítanými a pozměněnými rozměry. Přepočet byl proveden proto, aby měl vytištěný green part dostatečnou objemovou rezervu materiálu jak pro smrštění, tak pro dokončení obrábění. Obrobení vzorků bylo nezbytné z důvodu získání přesného rozměru zkušebních těles. Přepočet rozměrů po smrštění v jednotlivých osách byl proveden dle rovnic (1-8) uvedených v kapitole 1.5.3. Jednotlivé přepočítané hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 5.



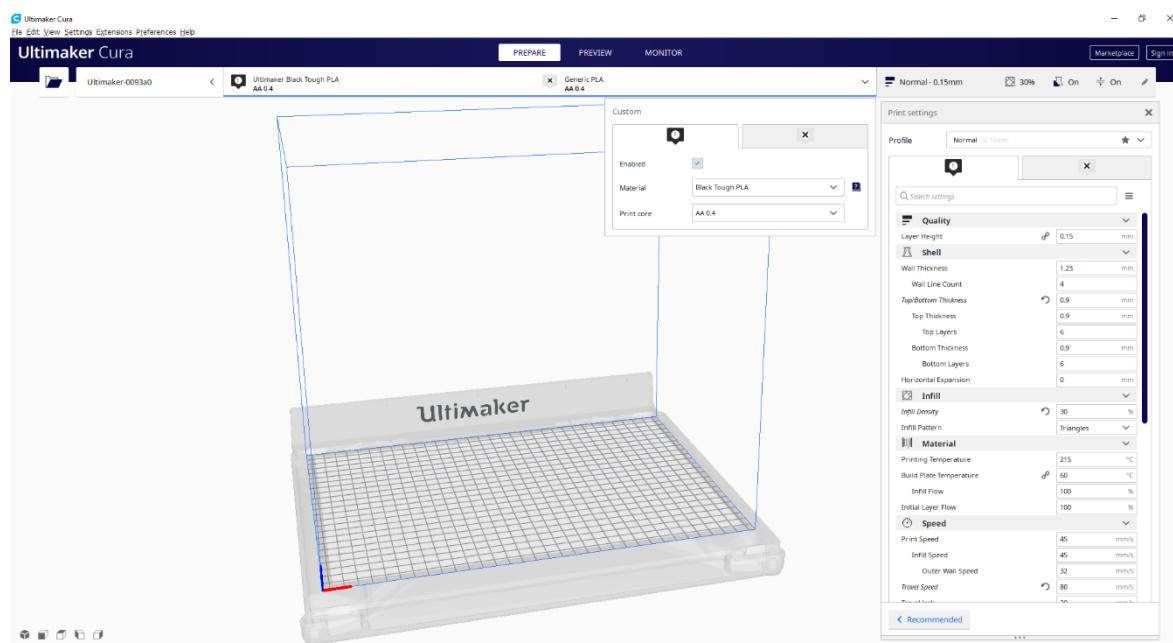
Obrázek 3.4 – Vzorek pro tisk ve vertikální poloze s přídavky na obrábění a vzorek pro tisk v horizontální poloze s přepočítanými rozměry kvůli smrštění

Tabulka 5 – Přepočet hodnot rozměrů vzorku

Osa/y	Rozměr na zkušebním vzorku	Rozměr s přídavkem obrábění	Procento smrštění v ose	Přepočítaná hodnota rozměru	Zvolená hodnota
XY	$\varnothing 6$ mm	$\varnothing 7,4$ mm	16 %	~ 9 mm	$\varnothing 11$ mm
XY	$\varnothing 12$ mm	$\varnothing 15,8$ mm	16 %	~ 19 mm	$\varnothing 21$ mm
Z	21 mm	21,6 mm	20 %	~ 28 mm	30 mm
Z	86 mm	86 mm	20 %	~ 108 mm	112 mm
-	R4 mm	R4 mm	-	-	R5 mm

Po úpravě rozměrů digitálního modelu byla CAD data vyexportována v souborovém formátu polygonové sítě typu STL, který je pro práci s daty k 3D tisku jedním z nejpožívanějších.

Pro zpracování digitálního modelu, rozvrstvení a transformaci do digitálního řídicího kódu byl použit software Ultimaker Cura na obrázku 3.5. Program se řadí do rodiny tzv. slicerů, kterých je celá řada. Výrobci tiskáren v mnoha případech vyvíjí jak zařízení, tak software (slicer) pro zpracování dat k 3D tisku. Nejinak tomu je i u výrobce Ultimaker. Programy jsou většinou poskytovány zdarma, avšak existují i placené verze, které nabízí sofistikovanější nástroje na práci s modely. Takovým příkladem mohou být uživatelsky definované podpory a různé struktury, pokročilejší a experimentální nastavení tiskových parametrů, a podobně. K placeným softwarům se řadí například program Simplify3D.⁴⁴



Obrázek 3.5 – Pracovní prostředí sliceru Ultimaker Cura

V pravé části na obrázku 3.5 je v programu rozbalovací lišta nastavení tiskových parametrů. Lze zde nastavit kvalitu tisku související s výškou vrstvy, počet linií, které tvoří okraje výtisků, procento a typ výplně, specifikace tištěného materiálu včetně teploty a procenta průtoku tryskou. Jako další důležitý parametr je volena rychlost tisku jak vnějších, tak vnitřních stěn a rychlost přejezdu tiskové hlavy mimo oblasti modelu. Velmi podstatné je nastavení chlazení, volba podpor, ať už jejich směru, typu nebo hustoty a jako poslední možnost aktivace sekundární trysky a její příslušná nastavení, jelikož tiskárna nabízí tisk dvou materiálů současně. V horní části pracovní plochy je lišta zpřístupnění pouze primární, sekundární nebo obou trysek zároveň. U levého okraje se nachází tlačítka sloužící k práci, manipulování, natáčení a jiným úpravám importovaných digitálních modelů.

K výrobě zkušebních vzorků byla použita pro tisk materiálu Ultrafuse 316L pouze primární tryska typu CC s průměrem 0,6 mm, která je přizpůsobená k aditivní výrobě z vícesložkových materiálů způsobujících abrazivní opotřebení. Aby během průchodu

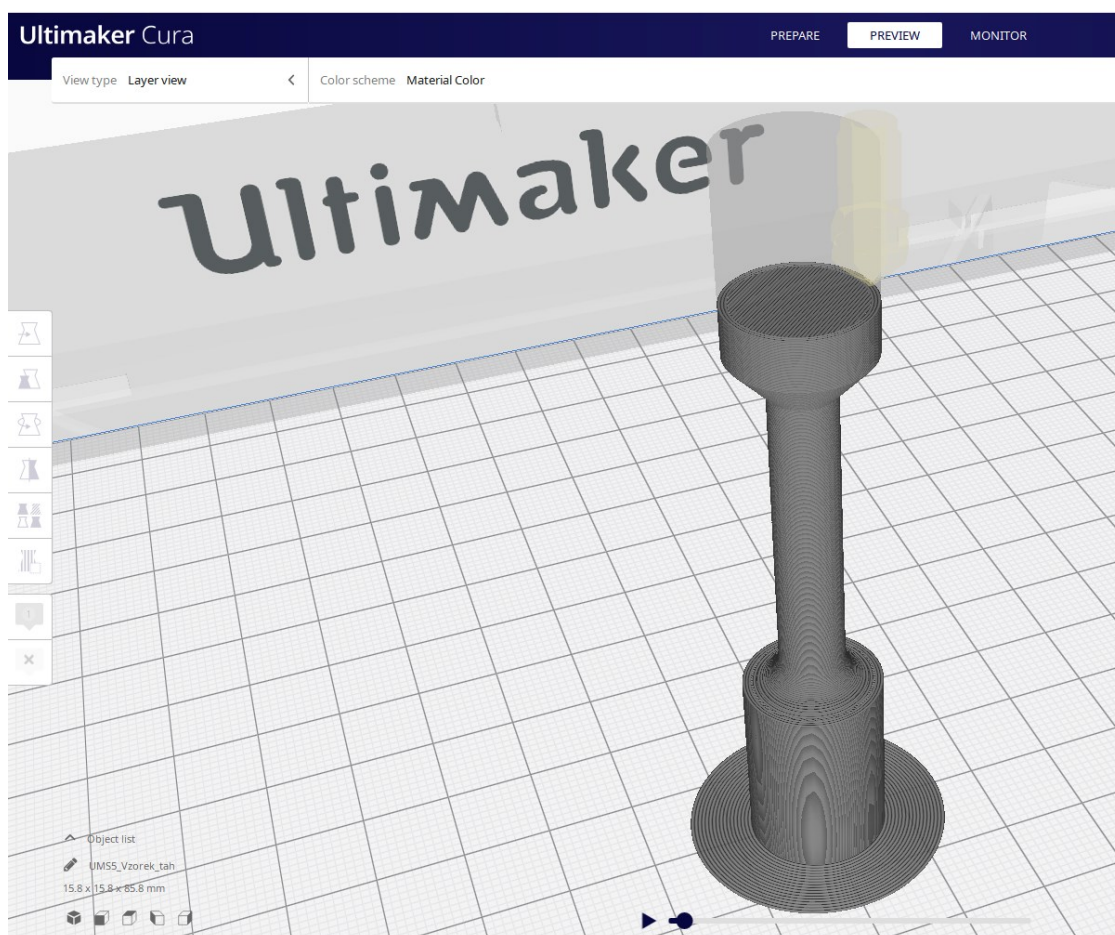
kompozitního materiálu, který obsahuje abrazivní médium, nedocházelo k odírání vnitřní stěny trysky a degradaci výstupního otvoru, nachází se ve špičce otěruvzdorný rubín.

Nastavení tiskových parametrů na záložce PREPARE, které byly použity pro materiál Ultrafuse 316L na základě doporučení výrobce, popisuje tabulka 6.

Tabulka 6 – Nastavení tiskových parametrů

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška vrstvy	0,15	mm
Tloušťka stěny	1,2	mm
Počet linií stěny	2	-
Výplň	100	%
Teplota trysky	260	°C
Teplota podložky	125	°C
Tok počáteční vrstvy	90	%
Tok materiálu výplně	106	%
Povolená retrakce	ANO	-
Retrakční vzdálenost	5	mm
Retrakční rychlost	45	mm.s ⁻¹
Rychlost tisku	45	mm.s ⁻¹
Rychlost tisku výplně	45	mm.s ⁻¹
Rychlost tisku vnějších stěn	35	mm.s ⁻¹
Rychloposuvy	80-100	mm.s ⁻¹
Chlazení	0	%
Typ adheze k podložce	Brim	-
Šířka brimu	15	mm
Povolené podpory	NE (ANO*)	-
*podpory byly použity pouze u tisku horizontálních vzorků		

V návaznosti po nastavení příslušných tiskových parametrů byl importován 3D model ve formátu STL a rozvrstven. Rozvrstvení probíhá automaticky na základě předem zvolených parametrů tisku. Software Cura dokáže přibližně odhadnout celkový tiskový čas, odvíjející se především z rychlosti tisku a procenta výplně, hmotnost tištěné součásti a při doplnění potřebných informací i cenu tisku (pouze materiálu). V záložce PREVIEW je po provedení rozvrstvení možné již model vrstvu po vrstvě zkontrolovat, dokonce si i prohlédnout simulaci pohybu trysky v rámci jedné vrstvy. V případě zjištění nedostatku během inspekce vrstev lze zpětně upravit parametry tisku nebo natočení modelu a provést rozvrstvení znovu. Rozvrstvený model v programu ilustruje obrázek 3.6



Obrázek 3.6 – Rozvrstvený model

Na obrázku 3.6 je v horní části průhledně naznačena tryska, jejíž pohyb se dá spustit pomocí simulace tisku příslušné vrstvy. Celková doba tisku jednoho vzorku byla po rozvrstvení spočtena na 2 hodiny. Tato hodnota je však pouze orientační a může se během tisku měnit, na což mají vliv nepředvídatelné skutečnosti. Pokud se jedná o tisk jednoduchého modelu, může se celkový spočtený čas tisku blížit reálné hodnotě.

Jakmile bylo provedeno rozvrstvení, byla data odeslána pomocí místní sítě do tiskárny. Pokud je zařízení připojeno k internetu pomocí Wi-Fi nebo síťového kabelu, lze do něj odeslat tiskovou úlohu z jakéhokoli počítače, který je připojen ve stejné síti a používá aktualizovanou verzi programu Cura. Druhá možnost transferu tiskových dat do tiskárny je přes přenosné zařízení s USB portem. Pokud není tiskárna online, nabízí místo odeslání dat přes síť možnost uložení tiskové úlohy na externí paměťové zařízení, které se pak jen připojí do tiskárny a ta si potřebná data načítá skrze USB port.

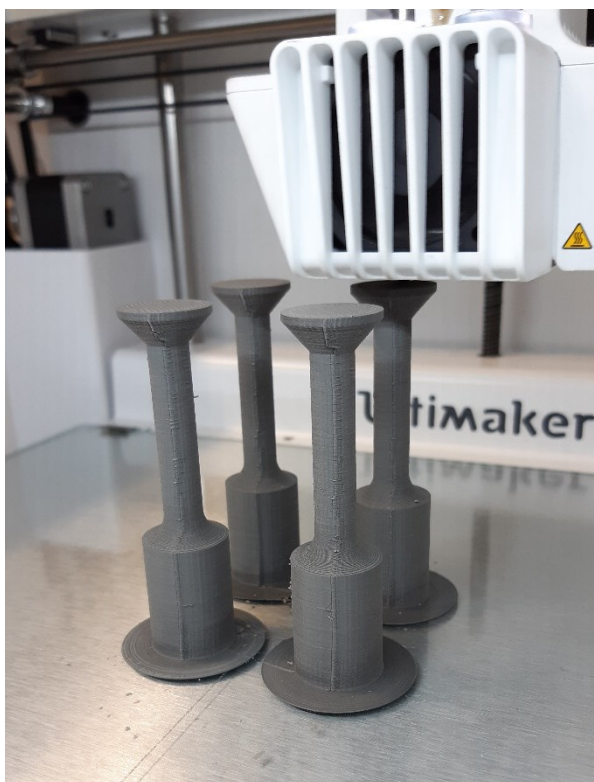
3.3 Tisk vzorků

Tištěn byl nejprve jeden zkušební vzorek (obr. 3.7) kvůli ověření vhodných tiskových parametrů a nastavení. Jelikož materiál Ultrafuse 316L vyžaduje speciální podmínky během

tisku (stabilní okolní teplota, adhesivní sprej nebo lepidlo aplikované na podložce) byla na zkušebním výtisku ověřena schopnost zařízení vytisknout díl při daných podmínkách.



Obrázek 3.7 – Vytištěný vertikální vzorek (green part)



Obrázek 3.7 – Tisk čtyř vertikálních vzorků najednou

Po ověření parametrů procesu bez znatelných komplikací byly další vzorky tištěny ve vyšším počtu současně během jedné tiskové úlohy (obr. 3.7) Pro zajištění přilnavosti k podložce byl použit adhezivní sprej 3DLAC.

Vertikální green party nevyžadovaly k tisku žádné podpory, na rozdíl od horizontálních. Jelikož díky pootočení tyčinek do vodorovné polohy vznikaly převisy přesahující hodnotu 45 °C nebo se část dílu vyskytovala ve vzduchu nad podložkou, bylo nutné podpory použít. K dostatečné přilnavosti výtisků k podložce byl použit adhezivní sprej, podpory a brim. Během tisku se ukázalo, že přilnutí k podložce je nedostatečné, což se projevilo odtržením a zkroucením krajů vzorků. Při nanášení dalších vrstev docházelo díky nestálému odvodu tepla k dalšímu kroucení krajů a buď k úplnému odtržení vzorku od podložky nebo bočnímu nárazu trysky do vzedmutého konce green partu.



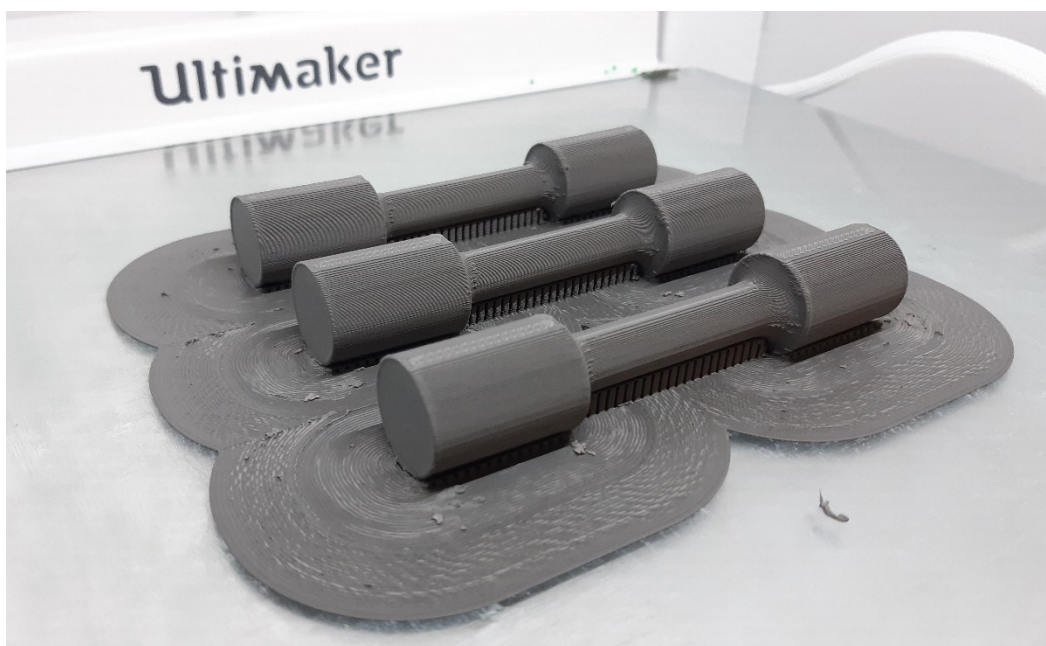
Obrázek 3.8 – Zkroucené a odtržené kraje horizontálního vzorku během tisku



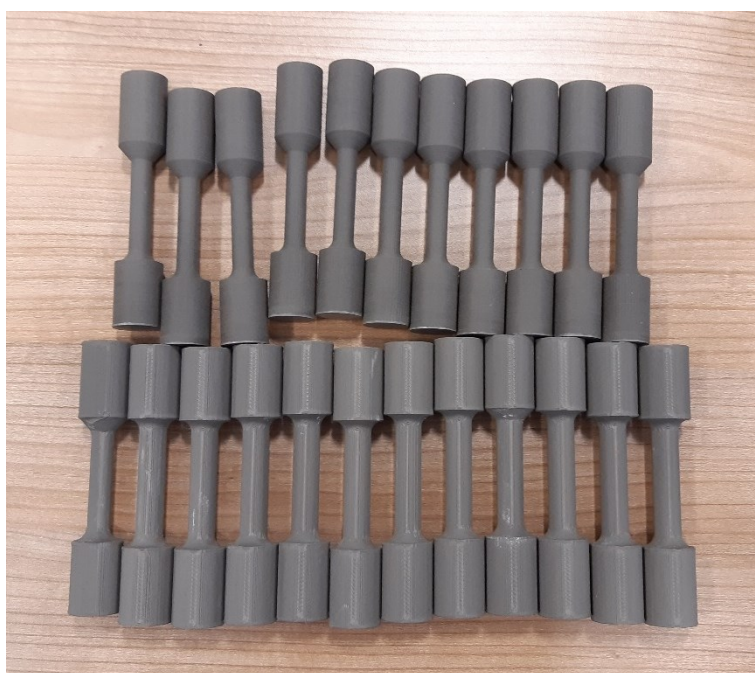
Obrázek 3.9 – Detail deformovaných nedotisknutých vzorků

K zamezení odtrhávání vzorků během tisku bylo místo adhezivního spreje použito adhezivní tuhé lepidlo aplikované na podložku před tiskem. Samotné lepidlo však nedokázalo vzedmutí konců zabránit.

Řešení v tomto případě přineslo zvětšení celkové plochy (Brim), kterou je díl v první vrstvě přilepen k tiskové podložce. Zvýšení hodnoty šířky Brimu na 15 mm se ukázalo být v kombinaci s adhezivním lepidlem dostatečným. S vyšší plochou přilnutí k podložce v podobě širšího Brimu již nenastávaly během tisku komplikace a horizontální green party byly vytištěny bez dalších obtíží viz obrázek 3.9.



Obrázek 3.9 – Vytisknuté vzorky po úpravě šířky Brimu



Obrázek 3.10 – Vytisknuté sady vzorků (green partů) v horní řadě ve vertikální poloze, ve spodní řadě v horizontální orientaci

3.4 Odstranění pojiva a slinování

Proces odstraňování pojiva a slinování byl proveden v zahraniční společnosti IGO3D GmbH, která je oficiálním partnerem společnosti BASF. Pro výrobce filamentu Ultrafuse společnost IGO3D zajišťuje služby odstraňování pojiva z green partů a slinování brown partů. Uživatel si zakoupí digitální lístky (jeden lístek odpovídá zpracování jednoho kilogramu vytištěného materiálu BASF Ultrafuse 316L) a obdrží v elektronické podobě štítky na označení vytištěných dílů a pro označení poštovní zásilky. Díly bývají zpracované během 14 dní, včetně dopravy.

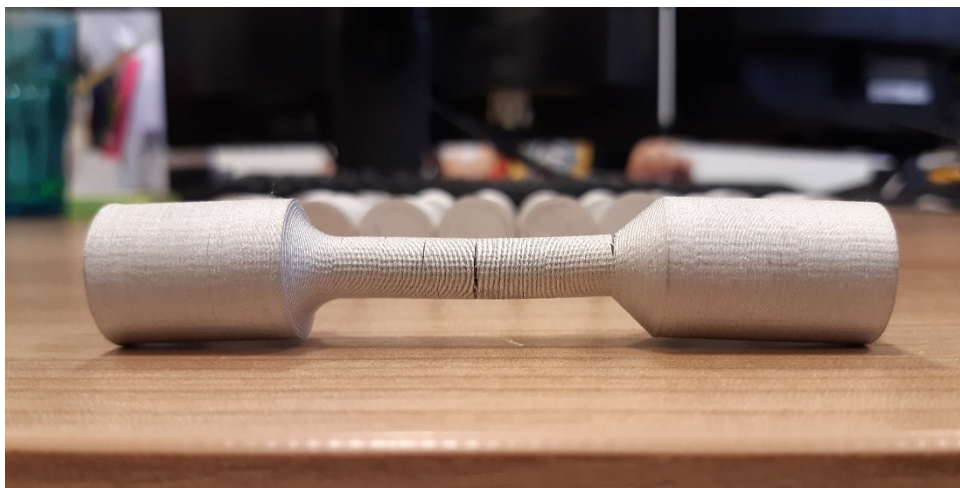
Průběh odstraňování pojiva a slinování probíhá podle postupu popsaného v kapitole 1.5.6 této práce. Bližší informace o procesu si společnost drží jako své know-how a další specifiky procesu neuvádí.

Z důvodu technologické nevhodnosti geometrie vzorků nebo z jiných neznámých příčin byly některé ze vzorků během procesu odstranění pojiva a slinování poškozeny. V nejvyšší míře byly poškozeny zejména vertikální vzorky, na kterých se ve směru vrstev utvořily trhliny, které u některých z tyčinek zapříčinily jejich rozlomení viz obrázek 3.10.



Obrázek 3.10 – Vertikální vzorky (white party) po slinování

Trhliny, které vznikly během slinování, doprovázely deformace a zkroucení vzorků. Jak deformace, tak trhliny vznikly s největší pravděpodobností při zpracování výtisků katalytickým napařováním a slinováním. Na obrázku 3.11 je zvýrazněno poškození vybraného vertikálního vzorku. Jedná se především o nežádoucí a rozsáhlé trhliny hlavně na zúžené prostřední části tyčinky a celková deformace geometrie.



Obrázek 3.11 – Detail poškozené a znehodnocené vertikální zkušební tyčinky

Žádný z vzorků, které byly vytištěny ve vodorovné poloze, nevykazovaly přítomnost viditelných trhlin. Jediným zjevným nedostatkem byla deformace tvaru, která se podobně jako u vertikálních vzorků, projevovala zkroucením geometrie viz obrázek 3.12.



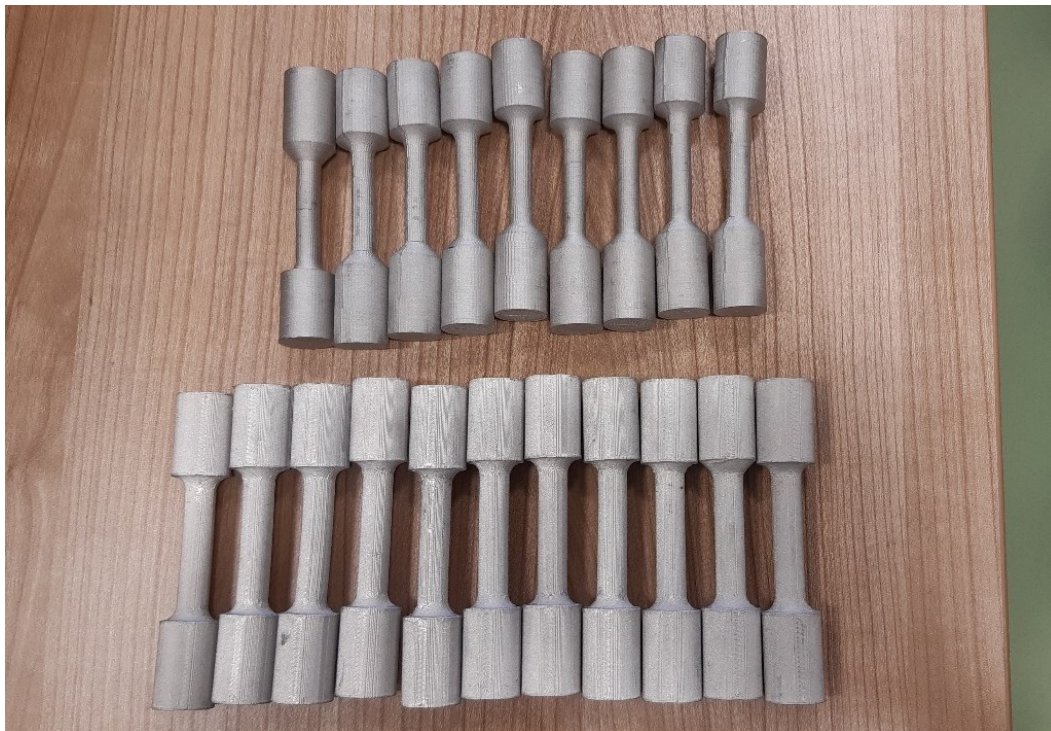
Obrázek 3.12 – Zkroucení horizontálního vzorku



Obrázek 3.13 – Horizontální vzorky

Některé ze vzorků díky deformacím a prasklinám nebylo možné obrobit a dále použít. Ostatní bez většího množství větších prasklin a zkroucení byly narovnány a obrobena na normalizovaný rozměr zkušebních těles.

Ze slinutých dílů bylo získáno 6 tyčinek vytištěných ve svislém směru a 10 vzorků vyrobených v horizontální orientaci viz obrázek 3.15.



Obrázek 3.14 – Sady vertikálních (horní řada) a horizontálních vzorků (spodní řada)



Obrázek 3.15 – Obrobené zkušební tyčinky

4 Zhodnocení výsledků a porovnání s technologií Powder Bed Fusion

4.1 Mechanické vlastnosti

Ze všech obrobených vzorků bylo šest vertikálních a šest horizontálních tyčinek podrobena tahové zkoušce. Zkouška byla provedena dle standardů ISO 6892 / ISO 10113 / ISO 10275. Výsledky všech provedených zkoušek ukazuje graf na obrázku 4.1.

Jak naznačují hodnoty z tabulky 8 a grafu na obrázku 4.1, jsou hodnoty meze pevnosti a kluzu zejména tyčinek tištěných ve vertikální orientaci podstatně nižší oproti horizontálním vzorkům. Velice nízké materiálové charakteristiky vertikálních vzorků poukazují na nedostatečné vlastnosti, které znamenají do jisté míry nepoužitelnost materiálu. Tělísky orientovanými ve vertikálním směru se v tomto případě nemá tedy prakticky význam dále zabývat, jelikož hodnoty dosahují pouze zlomku vlastností, které má konvenční ocel AISI 316L za pokojové teploty v litém stavu viz tabulka 7. Tato skutečnost mohla být způsobena nevhodným tvarem vzorku pro proces katalytického napařování a slinování, díky kterému byly vzorky značně popraskané a jak povrch, tak celková struktura byly do vysoké míry znehodnoceny.

Tabulka 7 – Hodnoty lité konvenční oceli AISI 316L za pokojové teploty⁴⁵

R_{p0,2 min.} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
195	480-680	45

Tabulka 8 – Hodnoty FDM vzorků získané tahovou zkouškovou

Číslo vzorku	Označení	E [GPa]	R_{p0,2} [MPa]	R_m [MPa]	F_m [kN]	A_t [%]	Z [%]
1	V1	99	172	256	7,25	4,8	8
2	V2	115	160	196	5,52	1,2	3
3	V3	145	167	184	5,20	0,2	4
4	V4	139	156	288	8,16	9,5	9
5	V5	80	164	299	8,42	11,8	10
6	V6	109	164	275	7,80	6,6	11
7	H1	114	161	430	12,15	37,4	28
8	H2	219	160	439	12,46	41,0	32
9	H3	85	114	313	8,85	31,0	19
10	H4	64	141	378	10,64	37,2	25
11	H5	123	173	449	12,74	29,7	22
12	H6	88	158	414	11,72	38,1	24

Tabulka 9 – Hodnoty PBF tištěných vzorků oceli 316L⁴⁶

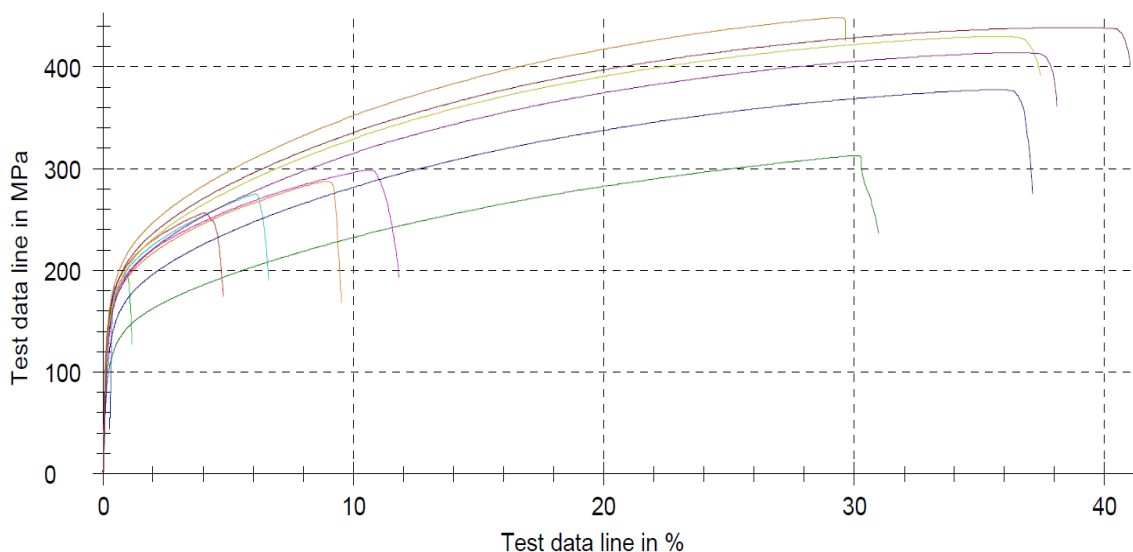
Zkušební vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
Vertikální	422	491	4,8	8
Vertikální po TZ	363	497	9,2	16
Horizontální	537	675	34,6	42
Horizontální po TZ	351	606	38,9	39

Ze srovnání tabulek 7, 8 a 9 vyplývá, že nejlepší materiálové charakteristiky v oblasti meze pevnosti vykazuje ocel vytištěná technologií SLM, následuje konvenční litá ocel a nejnižší hodnoty má slinovaná ocel vytištěná technologií FDM. Co se týče meze pevnosti u FDM vzorků, rovná se v horizontální tiskové orientaci hodnotám okolo 400 MPa, což se blíží číslům konvenčně vyráběného materiálu. Slinované vzorky obsahují vysoké procento pravidelné porozity viz kapitola 4.2, která do značné míry ovlivňuje celkovou pevnost materiálu.

Při porovnání tažnosti se konvenčnímu materiálu blíží pouze vzorky vyrobené v horizontální orientaci technologií SLM. Hodnoty tažnosti FDM vertikálních vzorků jsou v tabulce 8 zvýrazněny červeně, jelikož oproti horizontálním dosahovaly v některých případech velmi nízkých procent. Ve srovnání vodorovně stavěné vzorky ukazují přibližně poloviční tažnost materiálu při porovnání s konvenční ocelí. Ani jedna z orientací slinovaného materiálu se tedy neblíží hodnotám tažnosti konvenčně vyráběné oceli.

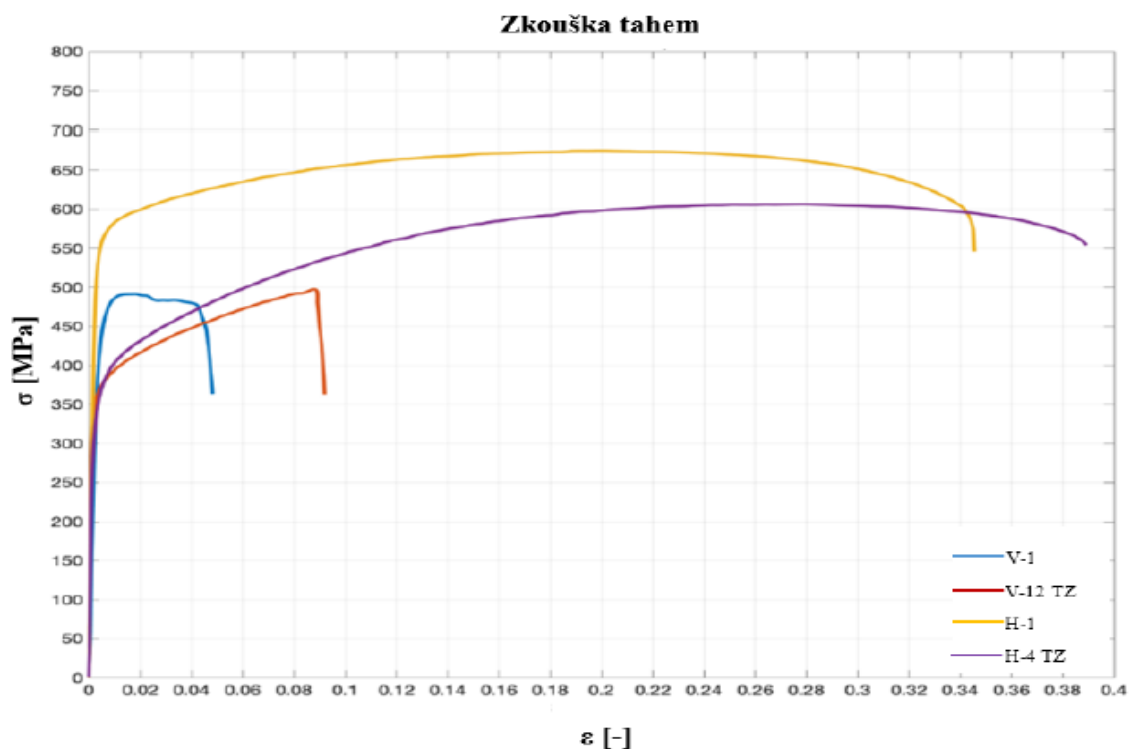
Modul pružnosti E se u všech vzorků diametrálně lišil a nedosahoval žádných konstantních hodnot. Obecně lze však poznamenat, že se modul pružnosti hodnotě u konvenční oceli ani u jednoho vzorku nepřibližoval.

Srovnání průběhů tahových zkoušek jednotlivých FDM vzorků v obou orientacích poskytuje diagram na obrázku 4.1



Obrázek 4.1 – Graf výsledků tahové zkoušky

Z grafu tahové zkoušky na obrázku 4.1 lze jednoznačně vyčíst a rozlišit křivky charakterizující průběh tahové zkoušky vertikálních vzorků, které jsou o poznání kratší a v nižších hodnotách než křivky získané přetržením horizontálních tělísek. Oproti křivkám získaným z testování vzorků vyrobených technologií PBF, mají křivky průběhu zkoušení několik odlišností. Největší rozdíl je patrný především v přechodové oblasti mezi elastickou a plastickou zónou.



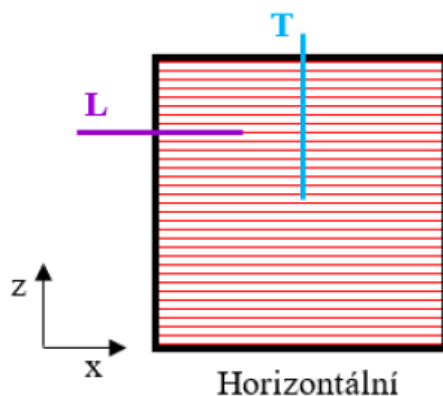
4.2 – Graf výsledků tahové zkoušky SLM vzorků⁴⁶

Červená a modrá křivka na obrázku 4.2 charakterizují průběh zkoušky tahem vzorků vytištěných technologií SLM, které prošly tepelným zpracováním. U obou směrů nanášení materiálu platí, že při tepelném zpracování došlo ke zvýšení houževnatosti materiálu, čímž došlo k jeho odpevnění. Tento jev dokazují nižší hodnoty meze kluzu. Pro zvýšení pevnosti je tedy u PBF tištěné oceli tepelné zpracování nežádoucí.

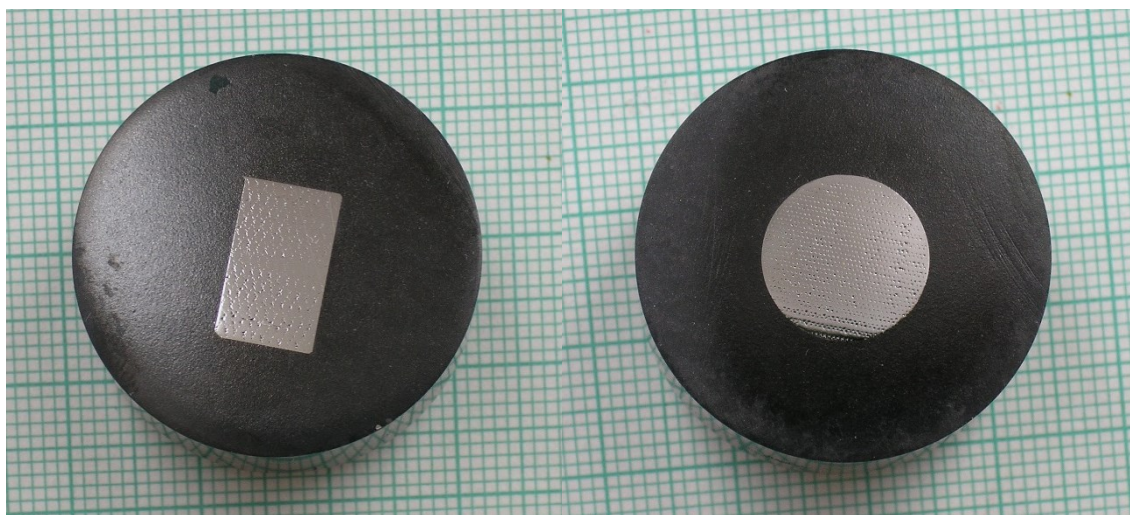
Jak vzorky vyrobené aditivní technologií FDM, tak SLM lze chováním přirovnat k vláknovým kompozitům, které je anizotropní. Vzorky, jejichž vrstvy byly orientovány horizontálně (napětí ve směru vláken), prokázaly vyšší pevnost a lepší materiálové vlastnosti než vzorky tištěné vertikálně (napětí ve směru vrstev). Skutečnost je způsobena snadnějším šířením trhlin ve směru vrstev nebo v rámci jedné vrstvy. Energie potřebná k porušení materiálu je tak o poznání nižší než energie, která je potřeba k přechodu trhliny přes vrstvy materiálu, jako je tomu u horizontálně tištěného objemu.

4.2 Mikrostruktura

Pro hodnocení mikrostruktury byly vzorky pro optickou mikroskopii připraveny mechanickou přípravou. Studovány byly vzorky tištěné v horizontální orientaci. V každém ze směrů řezů L a T byl vyroben jeden metalografický vzorek. Následující obrázek 4.3 přibližuje orientaci řezů vzorkem.



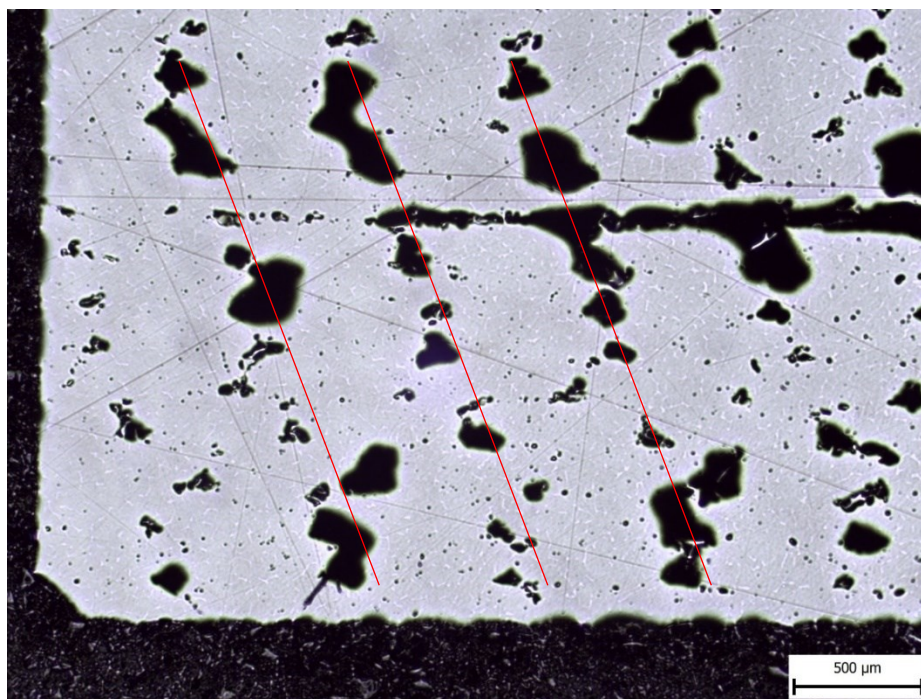
Obrázek 4.3 – Znázornění řezů horizontálním vzorkem



Obrázek 4.3 – Metalografický vzorek (vlevo) v horizontálním směru L po směru vrstev a (vpravo) vzorek ve vertikálním směru T kolmo na vrstvy

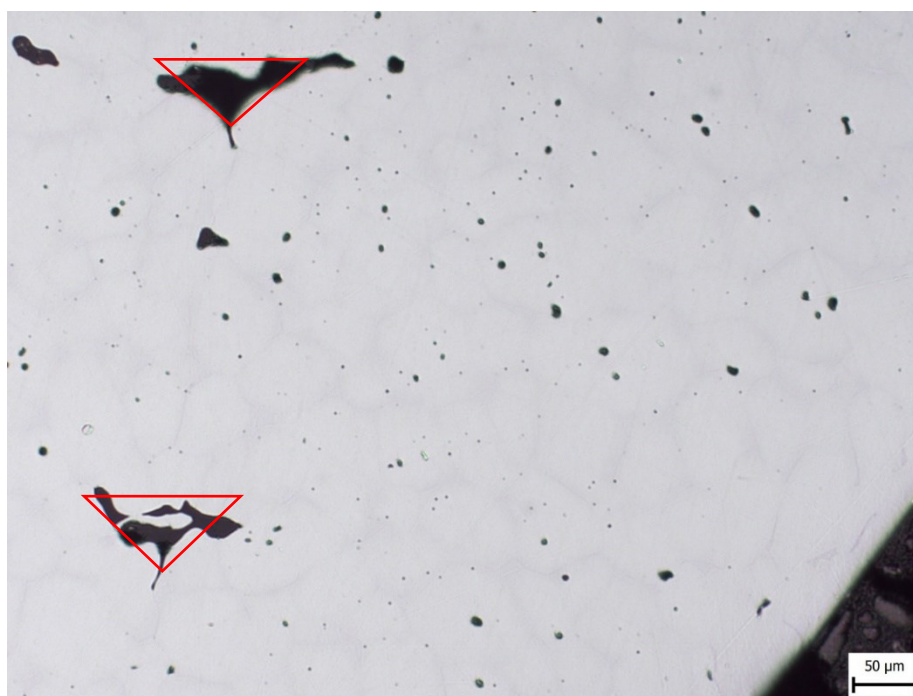
Metalografické výbrusy byly zkoumány nejdříve pouze v leštěném stavu a posléze i po naleptání. Na každém z výbrusů byla zkoumána v leštěném i naleptaném stavu 3 pole při různých hodnotách zvětšení (20-500x) v různých oblastech vzorků. Zkoumány byly okraje vzorků, středy a oblasti s pravidelným výskytem pórů.

Po přiblížení se struktura jeví velmi pravidelná, avšak s vysokou přítomností porozity. Vzhledem k vysokému obsahu pórů jsou ale materiálové vlastnosti obstojné. Na leštěných vzorcích výbrusu je patrné tepelné ovlivnění mikrostruktury, které bylo způsobeno procesem slinování, jež probíhá při specifickém teplotním režimu a vysokých teplotách těsně pod hranicí teploty tavení korozivzdorné oceli 316L. Struktura v leštěném stavu je zobrazena na následujících obrázcích.



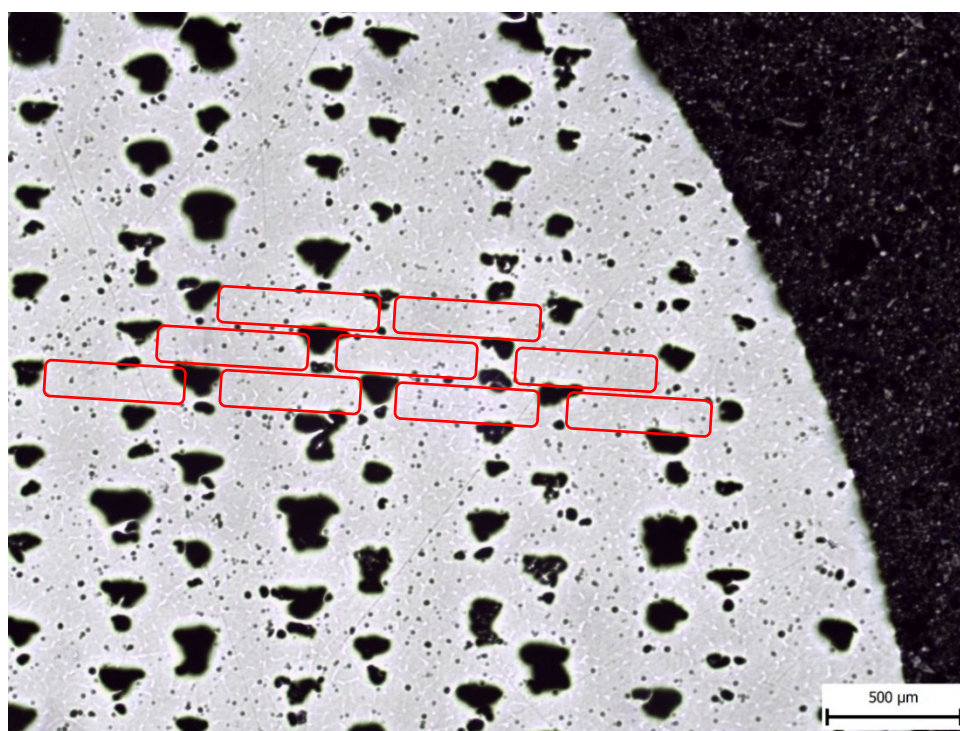
Obrázek 4.4 – Horizontální vzorek v podélném L řezu (zvětšení 20x)

Z obrázku 4.4 je na první pohled patrné, že struktura je do vysoké míry porézní. Porozita je však pravidelná a vyskytuje se především v místech styku mezi dvěma vedle sebe ležícími vlákny. Díky technologickým specifikacím procesu tisku a nanášení jednotlivých vláken vedle sebe tryskou, vznikají již ve stavu green partu mezi jednotlivými vlákny nepatrné mezery, které se po odstranění pojiva a slinování přetvoří do pravidelné porozity vyskytující se na rozhraní dvou vedle sebe ležících vláken. Směr a hranice vláken je na obrázku 4.4 naznačen červenými rovnoběžkami.



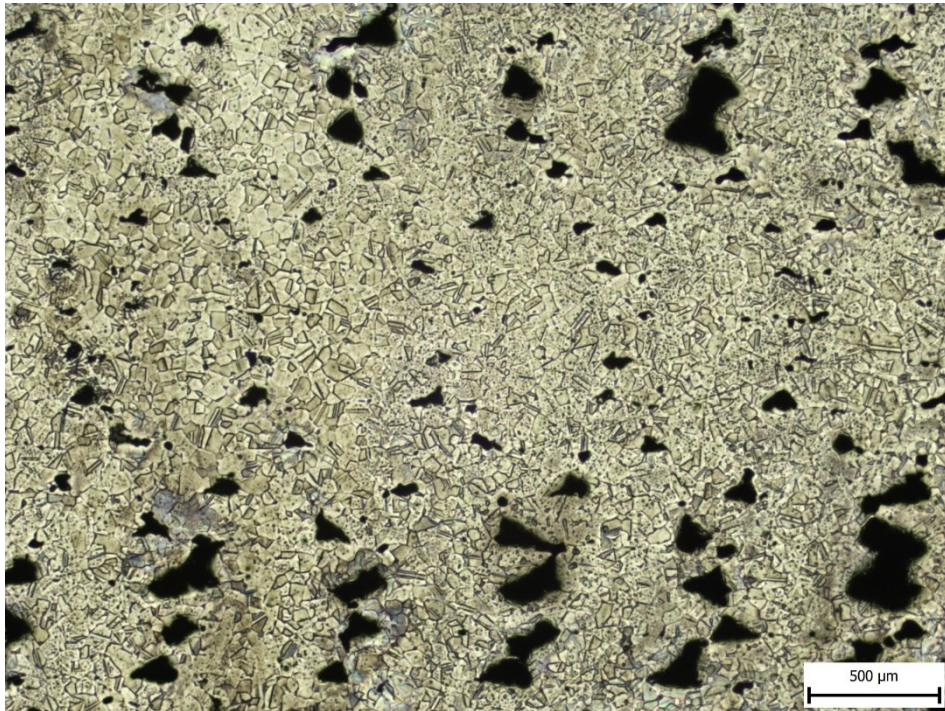
Obrázek 4.5 – Horizontální vzorek v příčném T řezu (zvětšení 100x)

Na obrázku 4.5 je možné najít detail dvou oblastí, ve kterých se vyskytují póry. Tentokrát na vzorku v příčném směru, kolmém na směr pokládání vrstev. Na obrázku jsou současně slabě viditelné hranice zrn mikrostruktury. Při bližším zkoumání tvaru pórů mezi vrstvami lze pozorovat jejich tvar připomínající obrácený rovnoramenný trojúhelník (vyznačeno červeně). Stejně póry ve tvaru trojúhelníčků můžeme najít i na obrázku s menším zvětšením, který zabírá větší plochu leštěného příčného vzorku. Tento tvar souvisí s podobou průřezu nanášených vláken. Jelikož tryska protlačuje materiál průměrem 0,4 mm s výškou vrstvy 0,15 mm, vzniká tak při položení taveniny vlákno, které má obdélníkový průřez se zaoblenými hranami. Obdélníkové průřezy vedle sebe položených vláken jsou červeně naznačeny na obrázku 4.6. Z důvodu pootočení orientace pohybu trysky o 90° (v ose XY) a posunutí v další vrstvě, která je pokládán na předchozí, vzniká mezi třemi vlákny mezera, která má právě trojúhelníkový tvar. viz obrázky 4.5 a 4.6. Z uvedených příčin je porozita vyskytující se v obou tiskových orientacích pravidelná, jelikož se vyskytuje na hranicích vedle sebe ležících vláken a mezi vrstvami, které jsou na sobě položené.

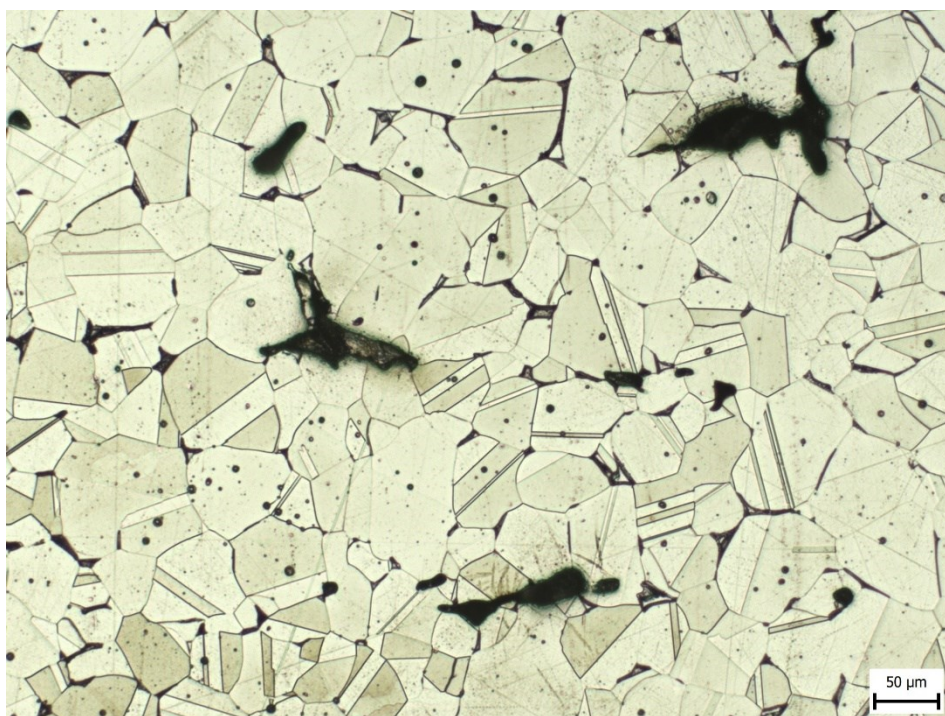


Obrázek 4.6 – Horizontální vzorek v příčném T řezu (zvětšení 20x)

Vybroušené a vyleštěné vzorky byly po prozkoumání v leštěném stavu a vyhodnocení snímků naleptány pro zvýraznění hranic zrn a lepší čitelnost mikrostruktury materiálu. V naleptaném stavu vzorků je jasně patrné, že během procesu slinování došlo k rekrystalizaci struktury viz obrázek 4.7. Výsledkem rekrystalizace jsou pravidelná, stejně velká zrna a kvalitní surový materiál v místech bez porozity. Materiál jako celek je do značné míry porézní, avšak s již zmíněnou pravidelností, díky které lze predikovat materiálové chování struktury vzorků. Následující obrázky ilustrují stavbu mikrostruktury v naleptaném stavu.

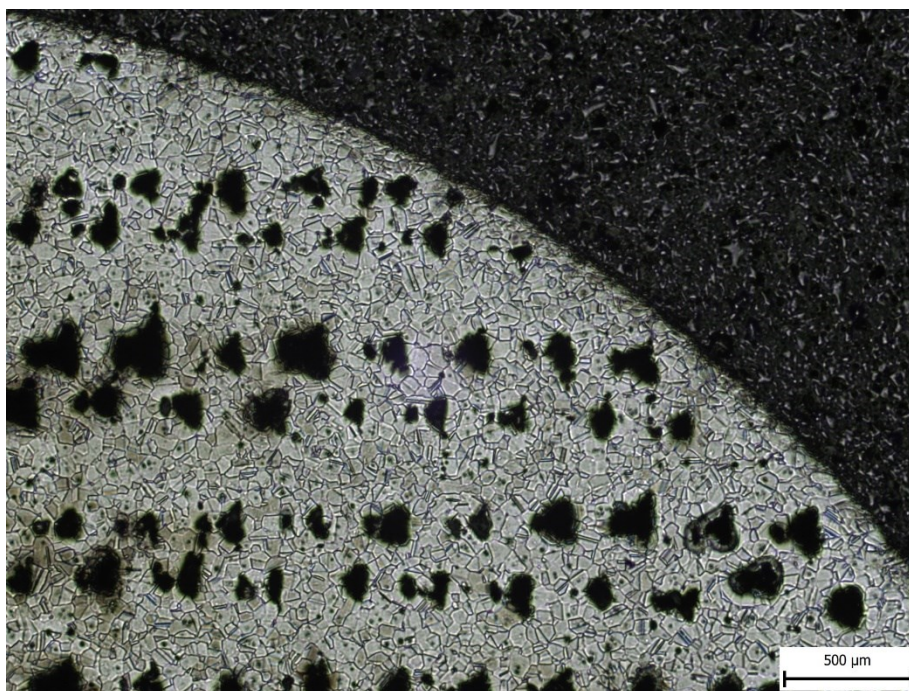


Obrázek 4.7 – Horizontální vzorek v podélném L řezu v leptaném stavu (zvětšení 20x)

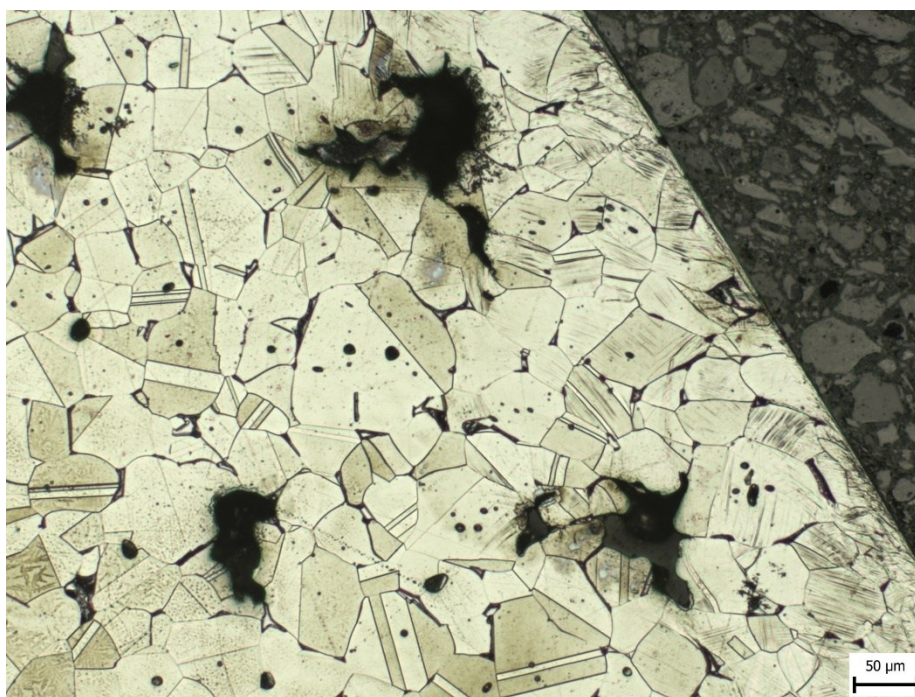


Obrázek 4.8 – Horizontální vzorek v podélném L řezu v leptaném stavu (zvětšení 200x) - detail

Z detailu mikrostruktury na obrázku 4.8 lze stanovit, že se jedná o austenitický typ zrn. Přítomnost austenitu potvrzují hojně vyskytující se deformační dvojčata, která jsou pro tento typ zrna a struktury typická. Pokud se v uspořádání vyskytuje segregace karbidů, je přirozeně rozložena na hranicích zrn.



Obrázek 4.9 Okraj horizontálního vzorku v příčném T řezu (zvětšení 20x)

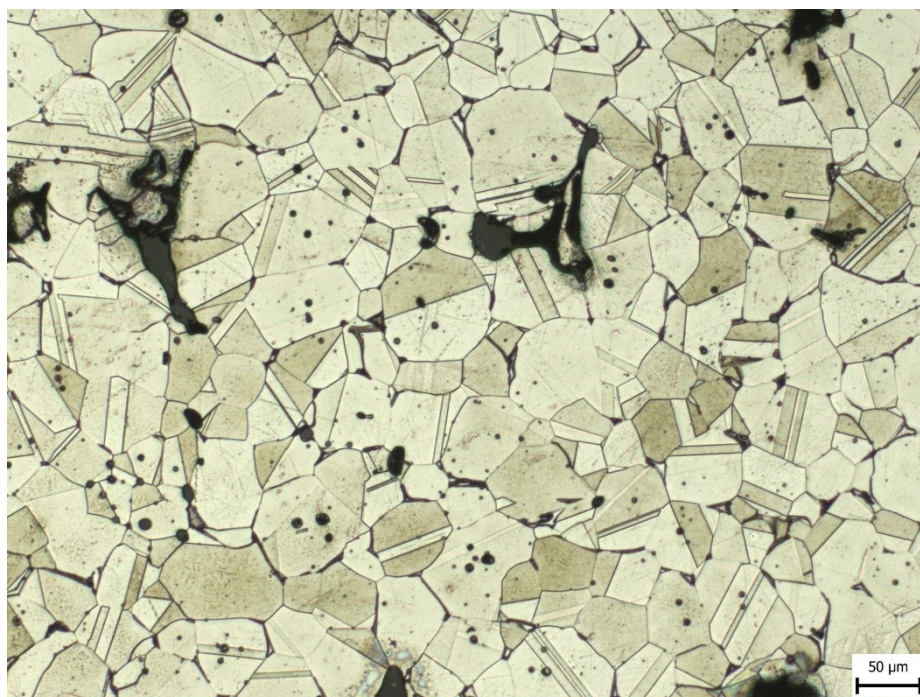


Obrázek 4.10 – Okraj horizontálního vzorku v příčném T řezu (zvětšení 100x) - detail

Na příčném řezu lze pozorovat obdobné chování materiálu jako u konvenčně vyráběné oceli. To se projevuje plastickou deformací zrn, která vzniká během technologického procesu soustružení a na obrázku 4.10 je patrná pokřivením zrn na kraji vzorku. Při leštění se stejně jako u lité oceli objevují na výbrusu deformační pásy (tmavé šmouhy uprostřed zrn na kraji vzorku), které vznikají během přípravy metalografických vzorků a jsou způsobeny

sníženou tvrdostí zrn a materiálu v těchto oblastech. Skutečnost, že je materiál poměrně měkký, tak odpovídá v konečném důsledku i celkově nižší pevnosti materiálu jako celku.

Materiál se tedy až na zvýšenou přítomnost porozity chová prakticky normálně jako kompaktní austenitická struktura přítomná i u konvenčně vyráběné oceli 316L. Chování materiálu je vzhledem k podmínkám jeho výroby a nepřítomnosti inertní atmosféry během tisku velmi překvapivé a pozitivní.

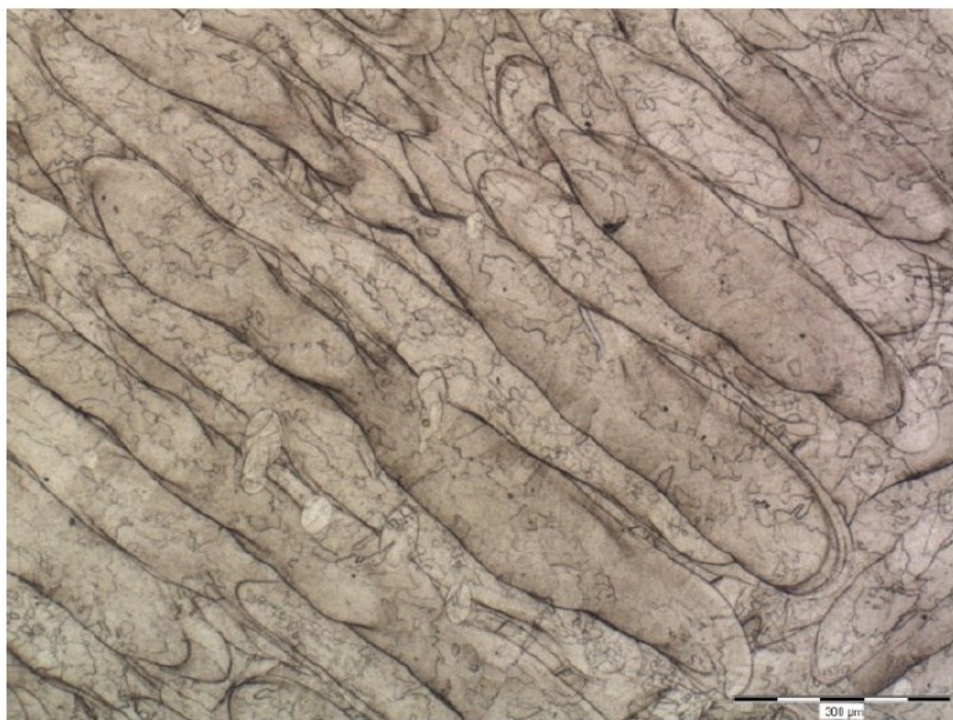


Obrázek 4.11 – Horizontální vzorek v příčném T řezu (zvětšení 100x) – střed vzorku

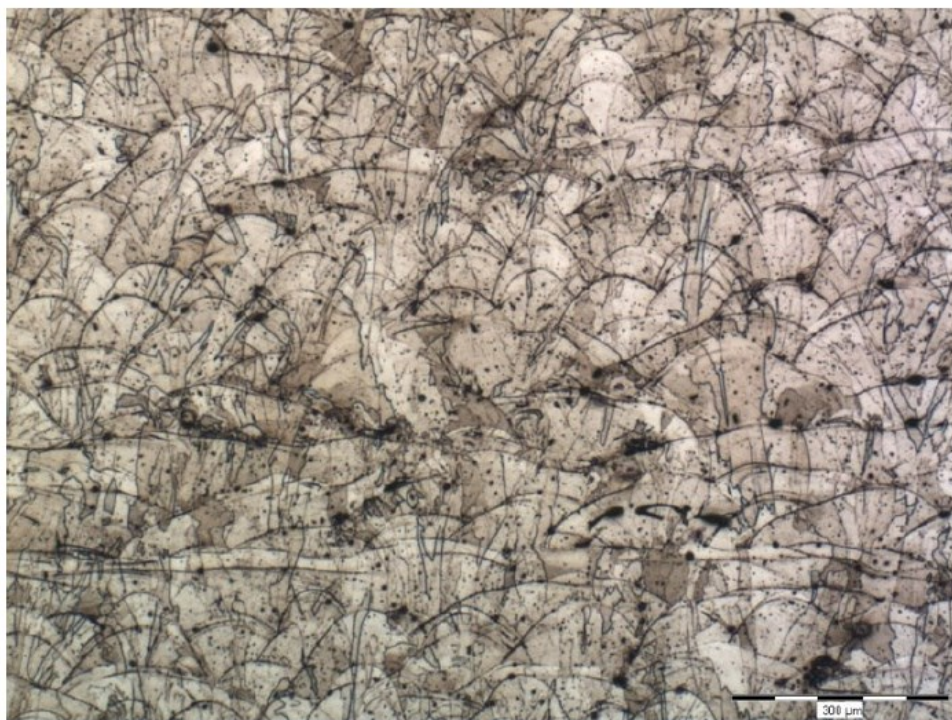
Tmavé menší oblasti na detailu mikrostruktury mohou být buďto karbidy, póry nebo nečistoty, které vznikají během naleptávání povrchu metalografického výbrusu. Struktura jako celek je pravidelná a co se týče tvaru a velikosti zrn stejná v horizontálním i vertikálním směru, a tudíž vypočitatelná. Vykazuje kompaktní materiálové chování, nikoliv náhodné. Velikost zrn se pohybuje v průměru přibližně okolo 50 μm a je do značné míry ovlivněna parametry procesu slinování (čas, teplota, teplotní režimy, ...).

Následující obrázky 4.12 a 4.13 ilustrují mikrostrukturu vzorků vyrobených laserovou technologií SLM. Členění a tvary zrn jsou diametrálně odlišné oproti struktuře slinované oceli 316L. Porovnání mikrostruktury tak prakticky není možné, jelikož mají zrna zcela odlišný charakter, který současně zapříčiňuje obtížné určení typu struktury. Jedná se však o stejný materiál korozivzdornou ocel 316L a austenitickou strukturu.

Zrna slinované oceli mají charakter typických rekrytalizovaných zrn, načež zrna SLM tištěné oceli vykazují silně atypické obtížně definovatelné tvary a prorůstají jednotlivými tavnými pásmy. Při bližším prozkoumání však ve struktuře lze pozorovat dvojčata, která jsou pro austenit typická. Ve větší míře je také patrná přítomnost karbidů.⁴⁶



Obrázek 4.12 – Horizontální SLM vzorek ve výchozím stavu (bez tepelného zpracování) v podélném řezu⁴⁶



Obrázek 4.13 – Horizontální SLM vzorek ve výchozím stavu (bez tepelného zpracování) v příčném řezu⁴⁶

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytisknout aditivní technologií FDM z materiálu BASF Ultrafuse 316L vzorky pro zkoušení materiálových vlastností, podrobit vytištěné díly procesu katalytického odstraňování pojiva a slinování, po obrobení na přesný tvar zkušebních tyčinek otestovat materiálové charakteristiky pomocí tahové zkoušky a vyhodnotit mikrostrukturu na základě metalografických výbrusů. Vzorky byly vytištěny ve dvojí orientaci, a sice horizontální s vrstvami pokládanými v osách X, Y a vertikální, kdy byly vrstvy orientovány v ose Z kolmé na tiskovou podložku.

V teoretické části práce byly popsány všechny dostupné aditivní technologie, které se používají k výrobě z kovových materiálů, jejich principy, výhody, nevýhody a výrobci. Tištěný materiál může být do tiskáren dodáván v několika formách jako například v podobě struny, také (častěji) ve formě jemného prášku, tyčinek a podobně. Každá z uvedených metod 3D tisku kovů se technologicky vzájemně liší a nachází své uplatnění vždy v jiné oblasti výroby a průmyslu.

Diplomová práce měla prokázat, že lze na zařízení, které stojí řádově desítky tisíc korun vytisknout v kancelářském prostředí bez přítomnosti inertní atmosféry plnohodnotný kovový díl a otestovat jeho vlastnosti. Výsledky experimentu následně porovnat s PBF laserovou technologií tisku kovů, která stojí řádově několik milionů korun, jen co se týče samotného zařízení. Profesionální SLM 3D tiskárna ke svému chodu vyžaduje navíc rozsáhlou doplňkovou infrastrukturu, bez které by nemohla fungovat, což opět navyšuje cenu výroby.

Porovnáním získaných výsledků bylo zjištěno, že ocel vyrobená slinováním obsahuje vysoké procento porozity, čemuž odpovídají snížené pevnostní hodnoty při porovnání s konvenčně vyráběnou litou ocelí a SLM tištěnou ocelí, která dosahuje z uvedených výrobních metod nejvyšší pevnosti výrobků. FDM vzorky vytištěné ve vertikální orientaci byly silně poškozeny procesy katalytického odstraňování pojiva a slinování, které způsobily popraskání a zkroucení tyčinek. Z toho důvodu bylo z původně vytištěné sady deseti vertikálních a deseti horizontálních vzorků po slinování a obrobení použitelných pouze 6 vertikálních a 10 horizontálních. Tahová zkouška byla provedena s šesti vzorky z obou tiskových orientací. Hodnoty pevnosti vertikálních vzorků díky silnému poškození a popraskání nedosáhly při zkoušce ani poloviny hodnoty materiálových vlastností ve srovnání s čísly, které uvádí výrobce filamentu Ultrafuse 316L. Horizontální vzorky již dosáhly lepších hodnot hranice meze pevnosti okolo hodnoty 400 MPa, která se už blíží hodnotě uváděné výrobcem a je menší přibližně o 150 MPa. Při přepočtu mechanických vlastností surového materiálu získaného slinováním a odečtení porozity bude však materiál vykazovat daleko vyšší hodnoty, které se již budou blížit referenčním číslům. Při porovnání FDM a SLM vzorků vytištěných vertikálně bylo zjištěno, že hodnoty tažnosti jsou u obou metod extrémně nízké v řádu pouze jednotek procent.

Ze snímků mikrostruktury byla zjištěna pravidelnost porozity, která vzniká z důvodu kladení jednotlivých vláken vedle sebe v rámci vrstvy. Díky faktu, že je porozita jak v podélném, tak příčném řezu vzorkem pravidelná, lze očekávat kompaktní chování materiálu a predikovat mechanické vlastnosti. Vytiskovaná a slinovaná součást se tak kvůli pravidelné a hojné porozitě chová jako kdyby byl objem materiálu záměrně odlehčený.

Technologie aditivní výroby kovových prototypů metodou FDM má na základě zjištěných mechanických vlastností a chování materiálu velký potenciál především v oblasti tisku designerských prvků. K výrobě funkčních součástí se na základě zjištěných poznatků příliš nehodí. K této skutečnosti přispívá i fakt, že jsou vytisknuty součásti v každé z os o určitá procenta rozměrově větší než finální výrobek, a to z důvodu smrštění, ke kterému dochází během slinování. Je tedy velmi náročné, ne-li nemožné vytisknout takový green part, který by měl po procesu slinování přesné rozměry v řádu desetin milimetrů. Z tohoto důvodu se tato technologie nehodí pro výrobu přesných a funkčních dílů. Své uplatnění a největší potenciál nachází v možnosti tisku dutých součástí, jejichž vnitřek tvoří dutá voštinová (nebo jiná) struktura a po slinování tak vzniká podstatně odlehčený díl. Další velkou výhodou je, že z dílů, pokud jsou duté, není nutné vysypávat žádný prášek, který při tisku laserovou technologií SLM v dutých součástech zůstává.

Navazující zkoumání FDM technologie tisku kovů by mělo směřovat ke zdokonalení a optimalizaci tiskových parametrů tak, aby vznikaly menší mezery mezi jednotlivými vlákny ve vrstvě, a tím docházelo k vzniku nižšího procenta porozity v materiálu. Další výzkum by se měl věnovat již zmíněné optimalizaci tiskového procesu, ale i operaci slinování s cílem snížit porozitu a interní defekty struktury.³⁸ Předmětem navazujícího studia slinovaného materiálu by mohlo být i zpracování izostatickým lisováním za tepla (Hot Isostatic Pressing), kterým je možné snížit procento celkové porozity.

Poděkování

Rád bych zde poděkoval především svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Marku Pagáčovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady, organizaci, přátelské jednání a poskytnutí možnosti zapojit se aktivně do dění v laboratořích 3D tisku. Dále mé velké díky patří celému týmu kolegů z Centra 3D tisku Protolab, zejména za vstřícné jednání, ochotu předávat své zkušenosti i znalosti a vytvoření příjemného pracovního kolektivu po celou dobu mého navazujícího magisterského studia.

V nejvyšší míře pak děkuji své rodině za trvalou, morální a finanční podporu v průběhu všech let mého studia. Moc si toho vážím, děkuji Vám za vše!

Diplomová práce byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Seznam použitých zdrojů

- [1] FORBES, *Jsme teprve na začátku, říká 3D král Průša. Prodal už 150 tisíc svých tiskáren* [online]. 2020. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.forbes.cz/jsme-teprve-na-zacatku-rika-3d-kral-prusa-prodal-uz-150-tisic-svych-tiskaren/>
- [2] PrusaPrinters [online]. 2020. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.prusaprinters.org>
- [3] 3DHUBS, *Knowledge Base – Material Consideration* [online]. 2020. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/collection/material-considerations/>
- [4] MATERIALISE, *Fused Deposition Modeling* [online]. 2020. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/fused-deposition-modeling?gclid=EAIaIQobChMIu9Li0umj6AIVzbTtCh1SngAdEAAYASAAEgJp_vD_BwE
- [5] 3DWISER, *Tiskové struny pro FDM/FFF 3D tiskárny* [online]. 2020. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/spotrebni-material-pro-3d-tiskarny/tiskove-struny/>
- [6] 3DHUBS, *Additive manufacturing technologies: An overview* [online]. 2020. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- [7] GONG, H., SNELLING, D., KARDEL, K. et al. *Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes* [online]. JOM 71, 880–885 (2019). [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3>
- [8] BASF, *Metal filament for 3D printing stainless-steel parts – Ultrafuse 316L* [online]. 2020. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/metal-solutions/Ultrafuse_316L.html
- [9] XJET, *Technology* [online]. 2020. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.xjet3d.com/technology/>
- [10] OH, Y., BHARAMBE, V., et al. *Microwave dielectric properties of zirconia fabricated using NanoParticle Jetting™* [online]. Addit. Manuf., 27 (2019), pp. 586–594. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.005>
- [11] BAI, Y., WAGNER, G., and WILLIAMS, C. B. (June 1, 2017). *Effect of Particle Size Distribution on Powder Packing and Sintering in Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals* [online]. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. August 2017; 139(8): 081019. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.4036640>

- [12] AMFG, *All You Need to Know About Metal Binder Jetting* [online]. 2019. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/>
- [13] ExOne, *Metal 3D Printers* [online]. 2020. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/metal-3d-printers>
- [14] HP, *Products – Metal Jet* [online]. 2020. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/metal-jet.html>
- [15] HAJNYŠ, Jiří. *Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/138575>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [16] ALLAHAM, N., FINA, F., et al. *Selective Laser Sintering 3D Printing of Orally Disintegrating Printlets Containing Ondansetron* [online]. Pharmaceutics. January 2020, 12(2):110. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/338994609_Selective_Laser_Sintering_3D_Printing_of_Orally_Disintegrating_Printlets_Containing_Ondansetron
- [17] XU, Z., WANG, Y., WU, D. et al. *The process and performance comparison of polyamide 12 manufactured by multi jet fusion and selective laser sintering* [online]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, Volume 47, Pages 419-426, ISSN 1526-6125. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.014>
- [18] GUSCHLBAUER, R., K. BURKHARDT, A., FU, Z., KÖRNER, C. *Effect of the oxygen content of pure copper powder on selective electron beam melting* [online]. Materials Science and Engineering: A, 2020, Volume 779, 139106, ISSN 0921-5093. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139106>
- [19] A. LODES, M., GUSCHLBAUER, R., KÖRNER, C. *Process development for the manufacturing of 99.94% pure copper via selective electron beam melting* [online]. Materials Letters, 2015, Volume 143, Pages 298-301, ISSN 0167-577X. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.12.105>
- [20] JUECHTER, V., SCHAROWSKY, T., SINGER, R., KÖRNER, C. *Processing window and evaporation phenomena for Ti–6Al–4V produced by selective electron beam melting* [online]. Acta Materialia, September 2014, 76:252–258. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263049810_Processing_window_and_evaporation_phenomena_for_Ti6Al4V_produced_by_selective_electron_beam_melting
- [21] 3Dnatives, *The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D Printing* [online]. 2020. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>

- [22] SADHU, A., CHOUDHARY, A., SARKAR, S., et al. *A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC-60%WC ceramic coating on Inconel 718* [online]. Surface and Coatings Technology, 2020, Volume 389, 125646, ISSN 0257-8972. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125646>
- [23] Loughborough University, *About Additive Manufacturing – Direct Energy Deposition* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- [24] OPTOMECH, *LENS Directed Energy Deposition (DED) 3D Printed Metal Technology* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://optomech.com/3dprinted-metals/lens-technology/>
- [25] OPTOMECH, *3D PRINTING SOLUTIONS FOR AN ADDITIVE AGE* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://optomech.com/>
- [26] BeAM, *What is Direct Energy Deposition and how does it work?* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.beam-machines.com/faq/directed-energy-deposition-work>
- [27] STAVOWY, M. T. *Comparison of LCAC and PM Mo deposited using Sciaky EBAM™* [online]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, Volume 73, Pages 162-167, ISSN 0263-4368. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.02.009>
- [28] PARK, H., NA, T., YANG, S. et. al. *Thermodynamic analysis of oxygen refining during electron-beam additive manufacturing of pure titanium products* [online]. Materials Letters, 2019, Volume 236, Pages 106-108, ISSN 0167-577X. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.083>
- [29] SCIAKY, *Additive Manufacturing* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>
- [30] Markforged, *Metal X System* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://markforged.com/metal-x/>
- [31] Desktop Metal, *Studio System™* [online]. 2020. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.desktopmetal.com/products/studio>
- [32] Konstrukter, *Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM)* [online]. 2020. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [33] ISO/ASTM 52900. *Additive manufacturing - General principles - Terminology*. 2015.
- [34] Desktop Metal *launches lower cost 3D printers* [online]. Metal Powder Report, 2017, Volume 72, Issue 4, Page 283, ISSN 0026-0657. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2017.06.036>

- [35] *Proces Instructions – Ultrafuse 316L* [online]. 2020. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://www.basf.com/global/images/about-us/locations/europe/german-companies/b3dps/documents/metals/BASF_Process_Instructions_Ultrafuse316L.pdf
- [36] *Technical Data Sheet – Ultrafuse 316L* [online]. 2020. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://www.basf.com/global/images/about-us/locations/europe/german-companies/b3dps/documents/metals/Ultrafuse_316L_Technical_Data_Sheet_TDS.pdf
- [37] *User Guidelines – Ultrafuse 316L* [online]. 2020. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://www.basf.com/global/images/about-us/locations/europe/german-companies/b3dps/documents/metals/BASF_Ultrafuse_316L_User_Guidelines.pdf
- [38] LIU, B., WANG, Y., LIN, Z., ZHANG, T. *Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering* [online]. Materials Letters, 2020, Volume 263, 127252, ISSN 0167-577X. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>
- [39] THOMPSON, Y., GONZALEZ-GUTIERREZ, J., KUKLA, CH. FELFER, P. *Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel* [online]. Additive Manufacturing, 2019, Volume 30, 100861, ISSN 2214-8604. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100861>
- [40] WU, G., LANGRANA, N., SADANJI, R., DANFORTH, S. *Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals* [online]. Materials & Design, 2002, Volume 23, Issue 1, Pages 97-105, ISSN 0261-3069. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00079-6)
- [41] *Ultimaker S5 User Manual* [online]. 2020. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: https://support.ultimaker.com/hc/en-us/article_attachments/360008628900/Ultimaker_S5_user_manual_Czech_.pdf
- [42] 3DWISER, *Ultimaker S5* [online]. 2020. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/fdm/ultimaker-s5/>
- [43] ULTIMAKER, *Ultimaker S5 – Powerful, reliable, versatile 3D printing* [online]. 2020. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5>
- [44] Simplify3D, *The experts agree: software matters* [online]. 2020. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com>
- [45] GEORGE, G., SHAIKH, H. *Introduction to Austenitic Stainless Steels. Corrosion of Austenitic Stainless Steels*. Narosa Publishing House, 2002. s. 1-36. ISBN: 0-87170-752-7
- [46] BENDA, Alexandr. *Mikrostrukturní a únavové charakteristiky oceli AISI 316L připravené 3D tiskem* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/136526>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.